

FeCoNiMn多组元合金的磁性临界行为研究

玄名彤, 王艺涵, 王贺, 龚元元*

南京理工大学材料科学与工程学院, 江苏 南京

收稿日期: 2026年4月18日; 录用日期: 2026年5月11日; 发布日期: 2026年5月20日

摘要

伴随着多组元合金的发现, 近几十年来关于其磁学性质的研究逐渐兴起。在磁性多组元合金的研究中, 一个关键的科学问题仍未得到解答: 高构型熵(或组分熵)与内禀磁相互作用之间究竟存在何种关联? 为阐明这一问题, 本文分析了等化学原子比多组元合金FeCoNiMn在铁磁-顺磁转变过程中的临界指数。结果表明: 该体系的临界指数 γ 与3-D海森堡模型相近, 但 β 值显著高于任何一种经典模型。多组元合金中原子占位无序导致的磁有序建立速率减缓, 是 β 值升高的关键因素。结合其他关于多组元合金磁性临界行为的研究, 本文认为高 β 值是具有随机原子占位的多组元固溶体的共同特征。

关键词

多组元合金, 磁性临界行为, FeCoNiMn合金, 组分熵, 磁交换作用

Study on the Magnetic Critical Behavior of FeCoNiMn Multi-Component Alloys

Mingtong Xuan, Yihan Wang, He Wang, Yuanyuan Gong*

School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu

Received: April 18, 2026; accepted: May 11, 2026; published: May 20, 2026

Abstract

Accompanied by the discovery of multi-component alloys, investigations into their magnetic properties have gradually emerged in recent decades. In the study of magnetic multi-component alloys, a key scientific question remains unanswered: What is the relationship between high configurational entropy and intrinsic magnetic interactions? To shed light on this question, this paper analyzes the critical exponents of the equiatomic multi-component alloy FeCoNiMn across the ferromagnetic-paramagnetic transition. The results show that the critical exponent γ of FeCoNiMn is close to that of

*通讯作者。

the 3-D Heisenberg model, while β is significantly higher than that of any classical model. Atomic site disorder in multi-component alloys slows down the establishment of magnetic order, which is a key factor leading to the elevated β value. Combined with other studies on the magnetic critical behavior of multi-component alloys, this work suggests that a high β value is a common feature of multi-component solid solutions with random atomic occupation.

Keywords

Multi-Component Alloys, Magnetic Critical Behavior, FeCoNiMn Alloy, Configurational Entropy, Magnetic Exchange Interaction

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

多组元合金是 21 世纪金属材料领域的前沿热点，其概念于 21 世纪初由 Yeh 与 Cantor 同时提出[1][2]。多组元合金的核心特征是高组分熵(ΔS_{config})，数学表达式为：

$$\Delta S_{\text{config}} = -R \sum x_i \ln x_i \quad (1)$$

其中， x_i 代表第 i 种组元的摩尔分数。高 ΔS_{config} 有助于稳定传统合金中难以存在的相结构，为开发具有特殊功能的新材料体系提供了重要途径。根据 ΔS_{config} 的大小，多组元合金可大致分为两类：高熵与中熵合金。高熵合金由 4~5 种组元构成，各元素原子百分比介于 5%~35% 之间， ΔS_{config} 大于 $1.5R$ [3][4]；中熵合金至少包含 3 种组元， ΔS_{config} 介于 $1\sim 1.5R$ 之间[5][6]。

大多数已报道的多组元合金含有 $3d$ 过渡金属或 $4f$ 稀土元素[7]-[12]，这些元素通常携带磁矩。因此，多组元合金是潜在的磁性功能材料。近年来，已有一些研究关注于多组元合金的磁学性能，例如：Kumari 和 Chaudhary 系统研究了 Mn、Cr、Al 等元素对 FeCoNi 中熵合金晶体结构、饱和磁化强度(M_s)及居里温度(T_c)的影响，并认为 FeCoNi 基中/高熵合金是具有应用潜力的软磁材料[7][8]；Law 与 Guo 在 $3d$ 过渡金属 - 主族元素高熵合金中观察到了磁结构相变及诱发相变伴随的磁热与压热效应，证实了高熵合金是潜在的固态制冷剂[13]-[15]；Huo 等人在稀土高熵合金体系中也发现了类似的磁热效应[11]。虽然上述研究已对多组元合金的磁学及磁相关功能性进行了报道，但“高组分熵与磁相互作用之间的关系是什么？”这一关键科学问题仍未被揭示。厘清这一问题有助于我们认识多组元合金与传统的二/三元合金在磁性方面的本质差异。分析铁磁 - 顺磁相变临界点附近的临界指数，并将其与平均场理论、3-D 海森堡模型等经典理论预测值进行对比，是理解磁相互作用物理本质的关键手段[16]-[20]。然而，目前针对多组元合金临界指数的研究仍不充分。

2025 年，本文的研究团队率先对 FeCoNiCr_x 的临界指数进行了拟合，并发现临界指数 β 高于任何一种已知的经典模型[21]。临界指数 β 反映了体系中铁磁有序建立速率的快慢： β 越高磁有序建立速率越慢。原子占位无序程度的提高是导致铁磁有序建立速率变慢的主要原因之一。在多组元合金，特别是具有面心立方或体心立方晶格的固溶体中，原子占位的无序程度与 ΔS_{config} 正相关。因此，高 β 值可能是多组元铁磁材料的一种基本特征。然而，这一观点还需要在其他多组元磁性合金中进行深入验证。为此，本文对 FeCoNiMn 的临界指数进行了研究。

2. 样品制备与表征

本文所研究的 FeCoNiMn_x ($x = 0.4, 0.6, 0.8$ 和 1) 合金样品均采用 WK-II 型真空电弧熔炼系统制备, 所用原料为纯度高于 99.9 wt.% 的 Fe、Co、Ni 和 Mn 单质。详细的制备步骤是: (1) 根据化学式精确配比原料, 合金铸锭总质量约为 16 g, 避免过重造成熔炼不均; (2) 将配好的金属原料放置于擦净的水冷铜坩埚中, 利用机械泵将熔炼腔抽真空至 5 Pa, 随后充入高纯氩气并再次抽真空; 此步骤重复 2 次, 以彻底排除空气; (3) 利用分子泵将真空度抽至 3×10^{-3} Pa, 随后向腔体内充入高纯氩气, 使压力显示接近 -0.05 MPa; (4) 熔炼金属钛块 1 分钟以吸收剩余氧气, 之后熔炼本文所需的铸锭 3~4 次, 以确保所制备的合金成份均匀; (5) 冷却后取出铸锭。退火处理的步骤是: 将铸锭密封于真空石英管中并加热至 1073 K, 保温 24 小时后炉冷样品至室温。

本文采用 Bruker-AXS D8 Advance 型 X 射线衍射仪对样品进行物相结构表征。测试样品为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 的薄片; 薄片表面经过离子抛光处理。射线源为 $\text{Cu K}\alpha$ 射线, 扫描步长为 0.02° , 测试角 2θ 的范围为 $20^\circ \sim 80^\circ$ 。测试结果表明: FeCoNiMn_x ($x = 0.4, 0.6, 0.8$ 和 1) 样品具有面心立方晶体结构(结果不做展示), 与已有文献结果一致[7] [8] [22]。本文利用 FEI Quanta 250F 场发射扫描电子显微镜(SEM)对样品微结构进行观测, 所用样品为上述 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 薄片。本文采用 7400-S 型振动样品磁强计测量磁性, 所用样品为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的标准立方体块体, 升降温速率设定为 3 K/分钟。

3. FeCoNiMn 多组元合金的磁学性质与临界行为

3.1. FeCoNiMn 合金的微结构与磁性

图 1 和图 2 分别展示了铸态 FeCoNiMn 和退火态 FeCoNiMn 的 SEM 微观形貌及成份分布情况。在铸态 FeCoNiMn 中, Fe、Co、Ni、Mn 四元素均匀分布, 没有出现偏聚。这意味着铸态 FeCoNiMn 是具有单一面心立方结构的固溶体。退火后, FeCoNiMn 的微观形貌和元素分布情况没有发生明显改变, 表明: 退火处理不会造成第二相(非面心立方相或成份偏离基底的面心立方相)的形成, 退火态的 FeCoNiMn 仍为具有单一面心立方结构的固溶体。在多组元合金中, 异类元素的添加有时会造成基体结构失稳, 造成第二相生成。例如: 在 FeCoNi 中熵合金中加入 Al 会导致材料的晶体结构向体心立方转变; 加入 Si 会导致更复杂的金属间化合物形成[7]。但 Mn 和 Cr 是为数不多的、不会造成面心立方结构失稳的过渡金属元素。因此, FeCoNiMn 仍保持单一面心立方结构。

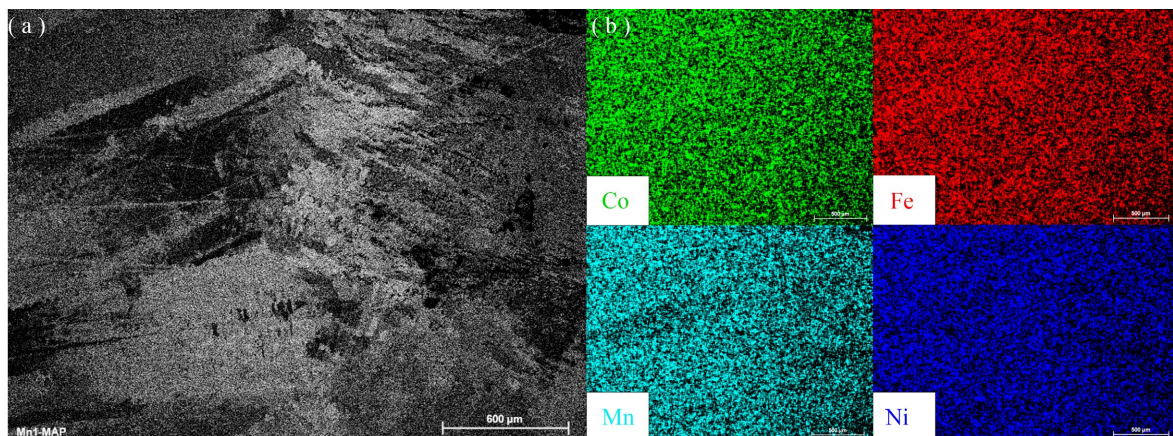


Figure 1. Morphology (a) and element distribution (b) of as-cast FeCoNiMn
图 1. 铸态 FeCoNiMn 的形貌(a)以及元素分布(b)

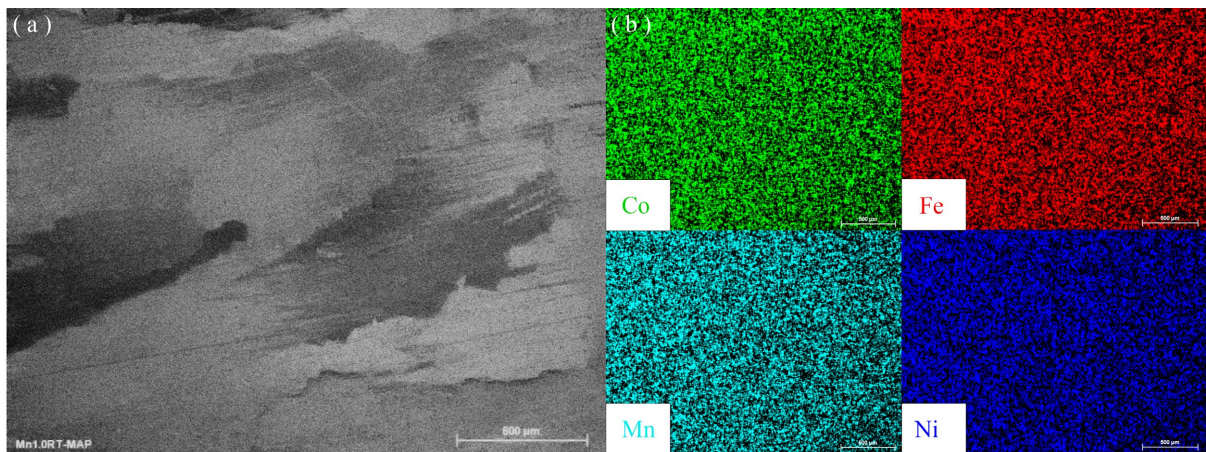


Figure 2. Morphology (a) and element distribution (b) of annealed FeCoNiMn
图 2. 退火态 FeCoNiMn 的形貌(a)以及元素分布(b)

图 3 展现了铸态 FeCoNiMn_x ($x = 0.4, 0.6, 0.8$ 和 1) 磁化强度随温度的变化曲线。随着温度的降低, 所有样品的磁化曲线均在某一临界温度处陡增。该陡增对应于样品的顺磁 - 铁磁相变。随着 x 的增加, FeCoNiMn_x 的居里温度逐渐下降, 由 $x = 0.4$ 的高于 700 K 降至 $x = 1$ 的低于 400 K。这是因为 Mn 具有反铁磁性, 其引入易破坏铁磁有序, 造成居里温度降低。需要指出的是, FeCoNiMn 的 T_C 低于 400 K, 便于磁化曲线的测量以及临界行为的分析。因此, 本文涉及的临界指数研究主要针对 FeCoNiMn 进行。

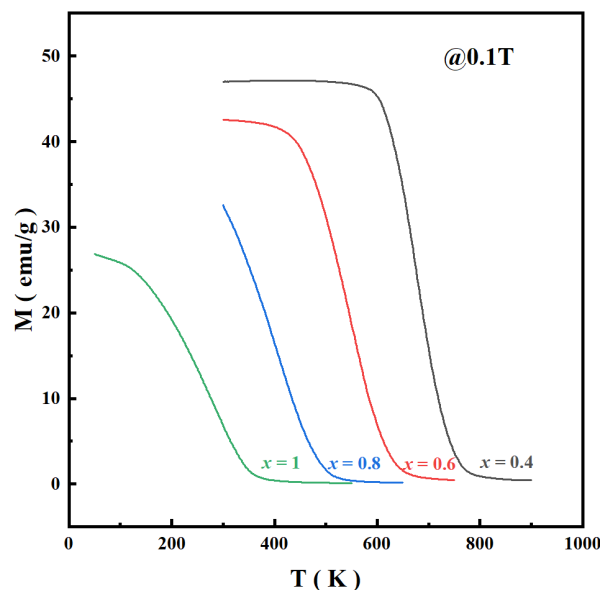


Figure 3. Thermomagnetic curves of FeCoNiMn_x ($x = 0.4, 0.6, 0.8$ and 1) alloys
图 3. FeCoNiMn_x ($x = 0.4, 0.6, 0.8$ 和 1) 合金的热磁曲线

3.2. 铸态与退火态 FeCoNiMn 的磁性临界行为

为了揭示 FeCoNiMn_x 多组元合金的磁相互作用机制, 本文利用修正 Arrott 曲线法(MAP 法)和 Kouvel-Fisher (K-F)法确定铸态及退火态 FeCoNiMn 的临界指数, 并利用标度理论检验所获临界指数的正确性。

在接近连续相变点时，不同材料在临界区域将表现出不同的临界行为。根据标度理论，对于发生二级相变的材料，其温度低于 T_C 的 M_s 、高于 T_C 的初始磁化率倒数 (χ_0^{-1}) 以及 T_C 处的磁化强度 M 满足如下方程：

$$M_s(T) = \lim_{H \rightarrow 0} (M) = M_0 (-\varepsilon)^\beta, \varepsilon \leq 0 \quad (2)$$

$$\chi_0^{-1}(T) = \lim_{H \rightarrow 0} \left(\frac{H}{M} \right) = \Gamma (\varepsilon)^\gamma, \varepsilon > 0 \quad (3)$$

$$M = DH^{\frac{1}{\delta}}, \varepsilon = 0 \quad (4)$$

其中， M_0 、 Γ 和 D 代表临界振幅； ε 定义为 $(T - T_C)/T_C$ ； β 、 γ 和 δ 则是接近 T_C 时临界行为的临界指数。

为了获得准确的临界指数，本文首先基于 MAP 法(式(5)，式中 a 和 b 为常数)对铸态 FeCoNiMn 的磁化曲线进行了拟合。

$$\left(\frac{H}{M} \right)^{\frac{1}{\gamma}} = a \frac{T - T_c}{T_c} + bM^{\frac{1}{\beta}} \quad (5)$$

通常情况下，三维材料的磁相互作用遵循平均场模型 ($\beta = 0.5, \gamma = 1, \delta = 3$) 或 3-D 海森堡模型 ($\beta = 0.365, \gamma = 1.386, \delta = 4.8$)。在 3-D 海森堡模型的假设中，每个自旋仅与其最近邻自旋发生相互作用；而在平均场模型的假设中，每个自旋与所有其他自旋产生的等效场发生相互作用。本质上，3-D 海森堡模型和平均场模型分别对应局域磁性与巡游磁性。图 4(a) 为铸态 FeCoNiMn 在 T_C 附近 (300~330 K) 的等温磁化曲线，图 4(b) 为与其对应的 Arrott 图 ($M^2 - H/M$ ，也就是基于平均场模型的 MAP 曲线)，图 4(c) 为基于 3-D 海森堡模型的 $(H/M)^{1/\gamma}$ 与 $M^{1/\beta}$ 的关系图。根据式(5)， $(H/M)^{1/\gamma}$ 与 $M^{1/\beta}$ 的关系图应在 T_C 附近呈现一系列直线，且 T_C 处的直线应通过原点。然而，从图 4(b) 和图 4(c) 中可以明显看出，这些曲线并非呈现严格的线性。这表明 FeCoNiMn 内部的磁相互作用不符合经典的 3-D 海森堡模型和平均场模型。

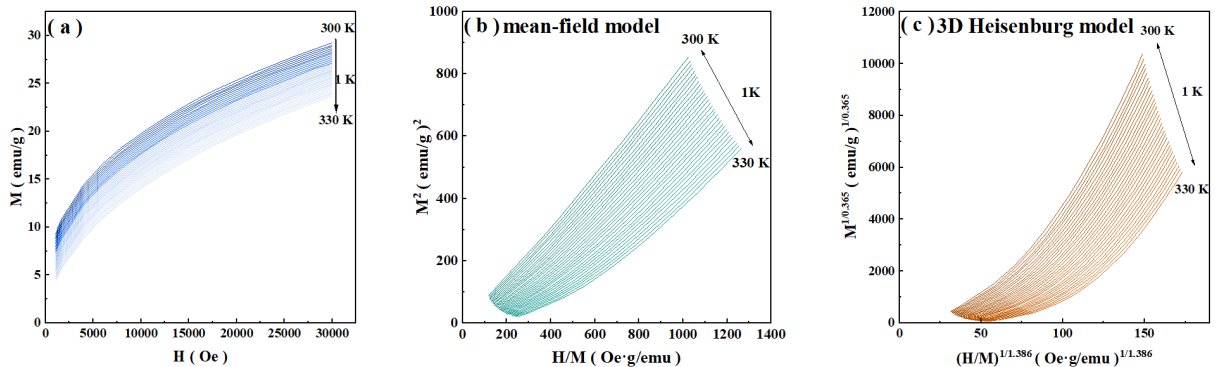


Figure 4. (a) Isothermal magnetization curves of FeCoNiMn alloy; (b) Arrott-MAP; (c) Relationship between $(H/M)^{1/0.365}$ and $M^{1/1.386}$

图 4. (a) FeCoNiMn 合金的等温磁化曲线；(b) Arrott-MAP；(c) $(H/M)^{1/0.365}$ 与 $M^{1/1.386}$ 关系

为获得准确的临界指数，本文将高场区域线性外推至 $M^{1/\beta}$ 和 $(H/M)^{1/\gamma}$ 轴，获得平均场模型中的 M_s 和 χ_0^{-1} 值；然后使用式(2)和式(3)对 M_s 和 χ_0^{-1} 进行拟合，从而得到新的 β 和 γ 值；接着，使用这些更新后的 β 和 γ 值创建新的 $(H/M)^{1/\gamma} - M^{1/\beta}$ 关系图；最后，重复这个迭代过程，直至获得稳定的 β 、 γ 和 T_C 值。图 5(a) 为最终得到的 M_s 以及 χ_0^{-1} 与温度的关系图。当 $T_C = 311.396 \pm 0.168$ K 时， $\beta = 0.895 \pm 0.022$ ；当 $T_C = 310.294 \pm$

0.232 K 时, $\gamma = 1.386 \pm 0.017$ 。使用这些新值构建的 $(H/M)^{1/\gamma}$ 与 $M^{1/\beta}$ 的关系图如图 5(b) 所示, 所有直线几乎相互平行, 且温度等于 311 K 的直线通过原点。

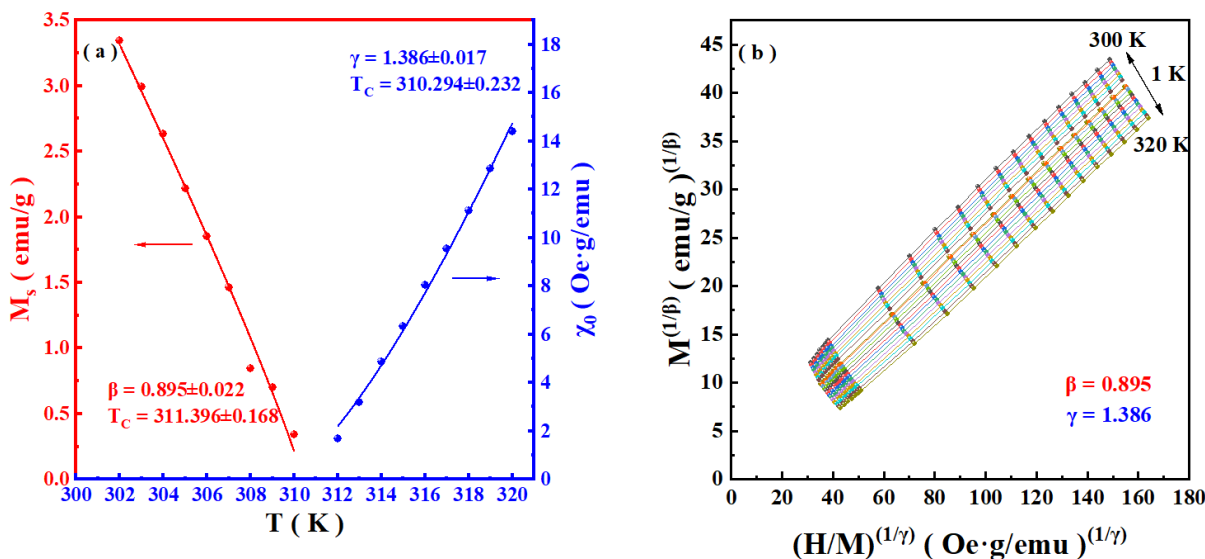


Figure 5. (a) M_s and χ_0^{-1} obtained based on MAP method; (b) Modified Arrott plot (relationship between $M^{1/\beta}$ and $(H/M)^{1/\gamma}$, where $\beta = 0.895$, $\gamma = 1.386$)

图 5. (a) 基于 MAP 法获得的 M_s 与 χ_0^{-1} ; (b) 修正的 Arrott 曲线图 ($M^{1/\beta}$ 和 $(H/M)^{1/\gamma}$ 的关系, 其中 $\beta = 0.895$, $\gamma = 1.386$)

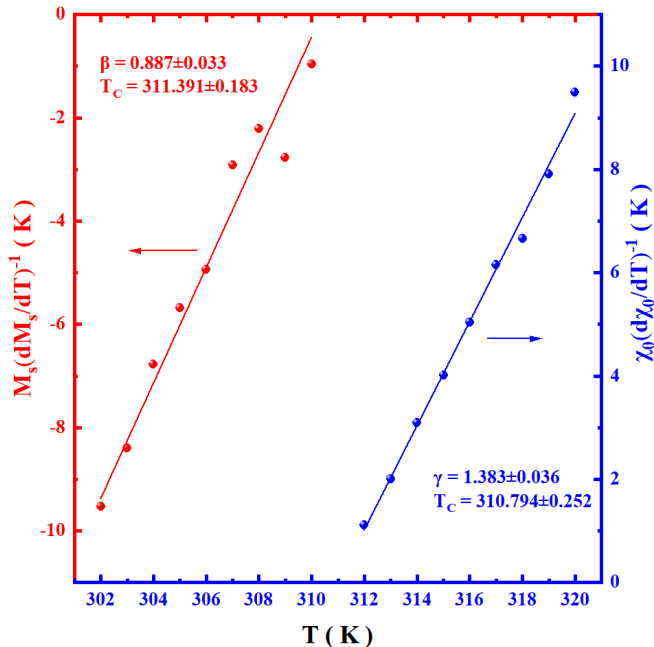


Figure 6. K-F curves of as-cast FeCoNiMn alloy
图 6. 铸态 FeCoNiMn 合金的 K-F 曲线

为了验证上述 β 、 γ 、 T_c 值的可靠性, 本文使用 K-F 方法重新计算了铸态 FeCoNiMn 的临界指数。根据 K-F 方程:

$$\frac{M_s(T)}{dM_s(T)/dT} = \frac{T - T_c}{\beta} \quad (6)$$

$$\frac{\chi_0^{-1}(T)}{d\chi_0^{-1}(T)/dT} = \frac{T - T_c}{\gamma} \quad (7)$$

绘制 $M_s/(dM_s/dT)$ 与 T 以及 $\chi_0^{-1}/(d\chi_0^{-1}/dT)$ 与 T 的关系图能够分别确定 $1/\beta$ 和 $1/\gamma$ (斜率); 通过分析直线与横轴 T 的交点可以得到 T_c 。使用得到的 β 、 γ 和 T_c ，创建新的式(5)，并重复该过程，直至临界指数收敛。图 6 为 K-F 法获得的 $M_s/(dM_s/dT)$ 与 T 以及 $\chi_0^{-1}/(d\chi_0^{-1}/dT)$ 与 T 的关系图。由此可得： $\beta = 0.887 \pm 0.033$ ， $T_c = 311.391 \pm 0.183$ K； $\gamma = 1.383 \pm 0.036$ ， $T_c = 310.794 \pm 0.252$ K。这些结果与使用 MAP 法得到的临界指数和居里温度的值是极其吻合的。

此外，式(4)表明 $\ln M - \ln H$ 曲线应在 T_c 处呈现斜率为 $1/\delta$ 的直线。图 7 为铸态 FeCoNiMn 的 $\ln M - \ln H$ 曲线，其中红色线最为线性，其对应的温度为 311 K，与 MAP 和 K-F 法拟合获得的 T_c 一致。通过计算红色线的斜率， δ 值可得为 2.548。该值与利用 MAP 法和 K-F 法所得的 β 和 γ 基于 $\delta = 1 + \gamma/\beta$ 计算所得的 δ 值 ($\delta = 2.548$ 和 2.559) 完全一致。

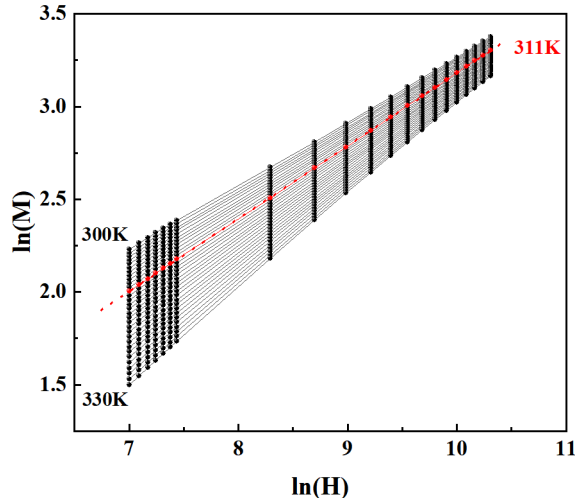


Figure 7. $\ln M - \ln H$ curves of as-cast FeCoNiMn alloy (the straight line at 311 K is highlighted in red)
 图 7. 铸态 FeCoNiMn 的 $\ln M - \ln H$ 曲线(311 K 处的直线用红色突出显示)

本文进一步引入标度理论验证所获临界指数的可靠性。根据标度理论，磁性状态方程可以表示为：

$$M(H, \varepsilon) = \varepsilon^\beta f \pm \left(\frac{H}{\varepsilon^\beta + \gamma} \right) \quad (8)$$

其中， $f^+(T > T_c)$ 和 $f^-(T < T_c)$ 是正则函数。通过将归一化磁化强度定义为 $m \equiv \varepsilon^{-\beta} M(H, \varepsilon)$ ，归一化场定义为 $h \equiv H \varepsilon^{-(\beta+\gamma)}$ ，式(8)可以改写为：

$$m = f^\pm(h) \quad (9)$$

这表明 m 与 h 的关系图应该归一为两条统一的曲线，一条对应于温度高于 T_c 的情况，而另一条对应于温度低于 T_c 的情况。使用 $\beta = 0.895 \pm 0.022$ 、 $\gamma = 1.386 \pm 0.017$ 和 $T_c = 311$ K 绘制的 m 与 h 的关系图如图 8(a) 所示。高于和低于 T_c 的磁化曲线均较好地归一化。必须指出的是：能够完成归一化的参数取值范围较大，通常在 T_c 的 $\pm 2\%$ 以及 β 和 γ 的 $\pm 10\%$ 内。为了进一步验证临界指数和 T_c 的准确性，本文采用了

一种更严格的方法：绘制 m^2 与 h/m 的关系图，如图 8(b)所示。磁化曲线仍然展现出较好的归一化效果，这证明了所得临界指数是可靠的。

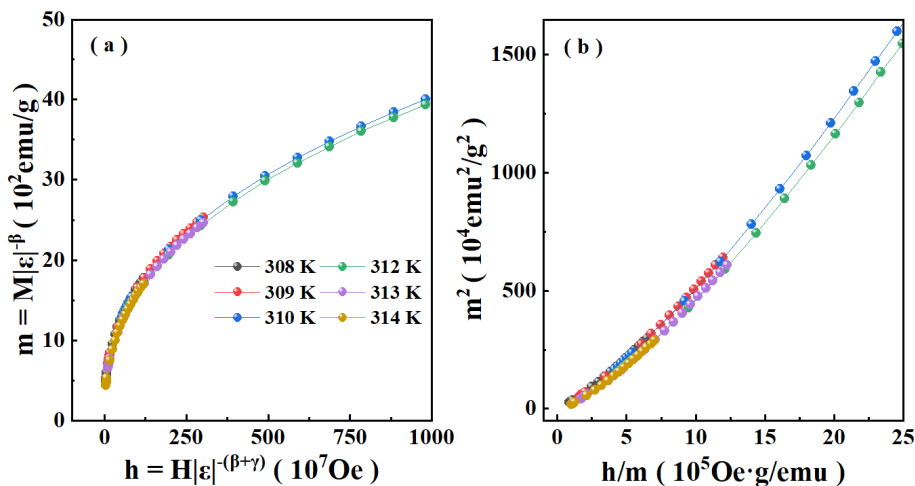


Figure 8. (a) m - h curve and (b) m^2 - h/m curve of as-cast FeCoNiMn

图 8. 铸态 FeCoNiMn 的(a) m - h 曲线以及(b) m^2 - h/m 曲线

为了研究退火对 FeCoNiMn 磁性临界行为的影响，本文测量了退火态 FeCoNiMn 的磁化曲线，并根据前文所述的方法拟合获得了可靠的临界指数(结果详见图 9)。退火导致 FeCoNiMn 的 T_C 由 311 K 下降至 239 K，但临界指数 β 仍高达 0.801，与退火前相当。退火导致的 T_C 降低可能是内应力消除的结果。

3.3. FeCoNiMn 合金高 β 值的机制

表 1 汇总 FeCoNiMn 的临界指数以及几种经典模型的理论值。与 FeCoMnCr_x 类似，FeCoNiMn 的 γ 接近 3-D 海森堡模型，但 β 远高于任何一种经典模型。

Table 1. Result data of standard test systems

表 1. 标准试验系统结果数据

组分或模型	β	γ	参考文献
平均场理论	0.5	1	[23]
3-D 海森堡模型	0.365	1.386	[23]
三维伊辛模型	0.325	1.24	[23]
三维 XY 模型	0.345	1.316	[23]
铸态 FeCoNiMn	0.895 ± 0.022 (MAP) 0.887 ± 0.033 (K-F)	1.386 ± 0.017 (MAP) 1.383 ± 0.036 (K-F)	本研究
退火态 FeCoNiMn	0.801 ± 0.045 (MAP) 0.801 ± 0.025 (K-F)	1.796 ± 0.018 (MAP) 1.796 ± 0.125 (K-F)	本研究

在中熵 FeCoNiMn 合金中，面心立方结构中的原子占位是无序的。本文认为 β 值较高的原因主要有二：(I) 原子无序占位导致的交换作用空间涨落。在本文研究的多组元合金中，Fe、Co、Ni 与 Mn 的随机分布导致原子间交换作用强度呈现显著的空间离散性，这种交换作用的非均匀分布破坏了传统铁磁体

的长程有序特征，使得磁化强度在临界区域的涨落范围扩大，导致拟合得到的 β 值偏离经典理论值。这种局域涨落在相变温度附近形成短程磁有序团簇，延长了临界区域的关联长度，使得磁化强度随温度变化的斜率增大，直接反映为 β 值升高。由于退火不会导致 FeCoNiMn 固溶体中的原子有序占位， β 值不会因退火降低。(2) 铁磁与反铁磁相互竞争对长程磁有序的抑制。在本文研究的多组元合金中，Mn 的引入导致了局域反铁磁的出现，其与铁磁相互作用的竞争抑制了长程磁有序的形成，使临界指数偏离有序体系的经典模型。

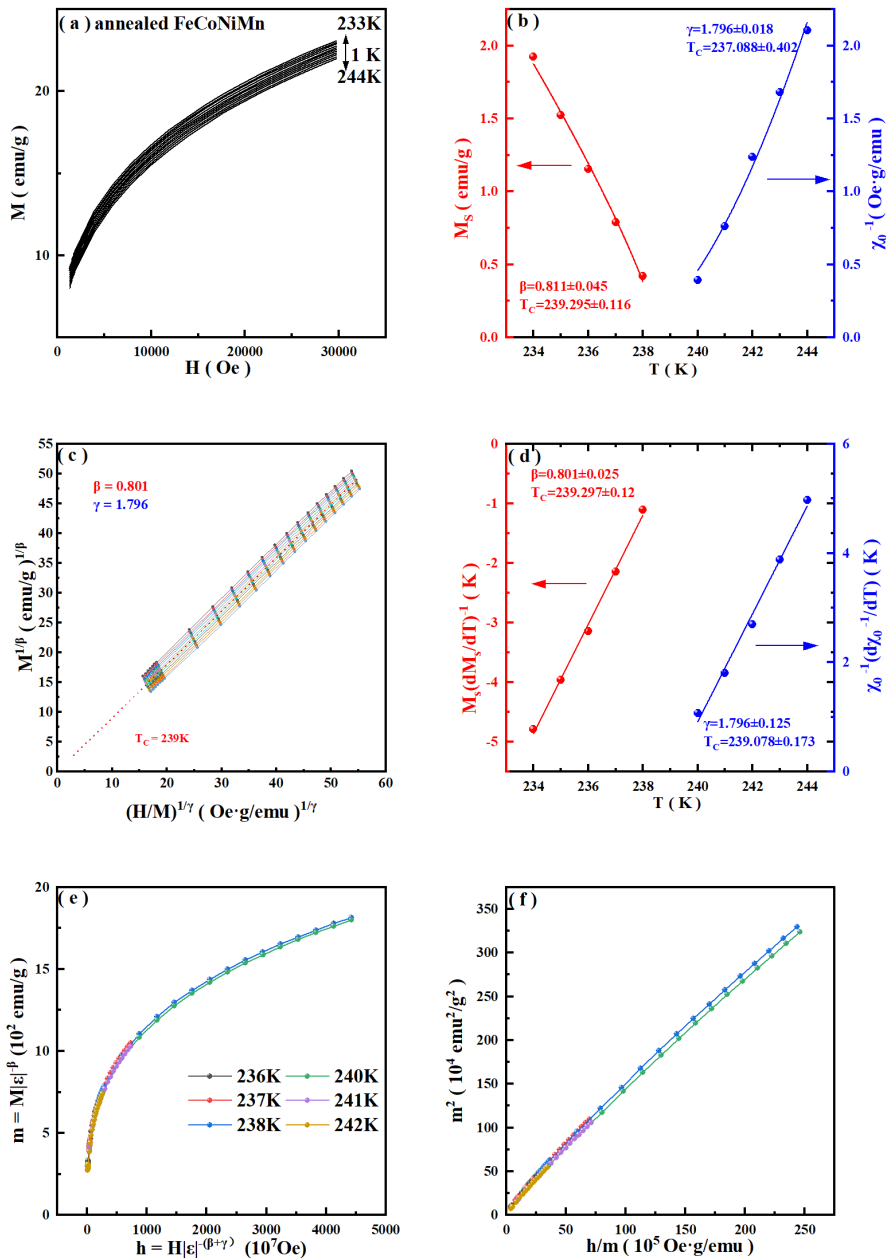


Figure 9. (a) Isothermal magnetization curves of annealed FeCoNiMn; (b) M_s and χ_0^{-1} obtained based on MAP method; (c) Modified Arrott plot ($\beta = 0.801 \pm 0.023$, $\gamma = 1.796 \pm 0.016$); (d) K-F curves; (e) m - h curves; (f) m^2 - h/m curves

图 9. (a) 退火态 FeCoNiMn 的等温磁化曲线; (b) 基于 MAP 法获得的 M_s 与 χ_0^{-1} ; (c) 修正的 Arrott 曲线图($\beta = 0.801 \pm 0.023$, $\gamma = 1.796 \pm 0.016$); (d) K-F 曲线; (e) m - h 曲线; (f) m^2 - h/m 曲线

4. 总结与展望

本文系统研究了 FeCoNiMn 多组元合金的磁性临界行为。结构与磁性的关联性分析表明：FeCoNiMn 合金呈现单一面心立方结构，Mn 的引入能显著降低饱和磁化强度与居里温度。对临界指数的拟合表明：FeCoNiMn 的临界指数偏离任何一种经典理论模型，其中 β 值显著高于平均场模型 ($\beta=0.5$) 与 3-D 海森堡模型 ($\beta=0.365$)，表明多组元合金中磁有序的建立速度因原子无序占位而下降。退火无法导致原子占位有序化，因而不会降低 β 值。据此，本文推测高 β 值是铁磁多组元合金的基本特征。

基金项目

本研究获得了南京理工大学大学生创新创业训练计划立项资助，项目编号为 202510288017。

参考文献

- [1] Cantor, B., Chang, I.T.H., Knight, P. and Vincent, A.J.B. (2004) Microstructural Development in Equiatomic Multicomponent Alloys. *Materials Science and Engineering: A*, **375**, 213-218. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257>
- [2] Yeh, J., Chen, S., Lin, S., Gan, J., Chin, T., Shun, T., et al. (2004) Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes. *Advanced Engineering Materials*, **6**, 299-303. <https://doi.org/10.1002/adem.200300567>
- [3] Zhang, Y., Zhou, Y.J., Lin, J.P., Chen, G.L. and Liaw, P.K. (2008) Solid-Solution Phase Formation Rules for Multi-Component Alloys. *Advanced Engineering Materials*, **10**, 534-538. <https://doi.org/10.1002/adem.200700240>
- [4] Yeh, J. (2015) Physical Metallurgy of High-Entropy Alloys. *JOM*, **67**, 2254-2261. <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1583-5>
- [5] Yeh, J. (2013) Alloy Design Strategies and Future Trends in High-Entropy Alloys. *JOM*, **65**, 1759-1771. <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0761-6>
- [6] Lu, Z.P., Wang, H., Chen, M.W., Baker, I., Yeh, J.W., Liu, C.T., et al. (2015) An Assessment on the Future Development of High-Entropy Alloys: Summary from a Recent Workshop. *Intermetallics*, **66**, 67-76. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2015.06.021>
- [7] Kumari, P., Gupta, A.K., Mishra, R.K., Ahmad, M.S. and Shahi, R.R. (2022) A Comprehensive Review: Recent Progress on Magnetic High Entropy Alloys and Oxides. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **554**, Article 169142. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.169142>
- [8] Chaudhary, V., Chaudhary, R., Banerjee, R. and Ramanujan, R.V. (2021) Accelerated and Conventional Development of Magnetic High Entropy Alloys. *Materials Today*, **49**, 231-252. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.03.018>
- [9] Huo, J., Huo, L., Li, J., Men, H., Wang, X., Inoue, A., et al. (2015) High-Entropy Bulk Metallic Glasses as Promising Magnetic Refrigerants. *Journal of Applied Physics*, **117**, Article 073902. <https://doi.org/10.1063/1.4908286>
- [10] Li, J., Xue, L., Yang, W., Yuan, C., Huo, J. and Shen, B. (2018) Distinct Spin Glass Behavior and Excellent Magnetocaloric Effect in Er₂₀Dy₂₀Co₂₀Al₂₀RE₂₀ (RE = Gd, Tb and Tm) High-Entropy Bulk Metallic Glasses. *Intermetallics*, **96**, 90-93. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2018.03.002>
- [11] Huo, J., Huo, L., Men, H., Wang, X., Inoue, A., Wang, J., et al. (2015) The Magnetocaloric Effect of Gd-Tb-Dy-Al-M (M = Fe, Co and Ni) High-Entropy Bulk Metallic Glasses. *Intermetallics*, **58**, 31-35. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2014.11.004>
- [12] Shao, Y., Cheng, S., Zhang, M., Miao, X., Zhang, Y., Chen, H., et al. (2024) Multiple Magnetic Phase Transitions and Giant Refrigerant Capacity in a GdDyhoErTm High-Entropy Alloy. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **17**, 1654-1661. <https://doi.org/10.1021/acsami.4c18839>
- [13] Law, J.Y., Moreno-Ramirez, L.M., Díaz-García, Á., Martín-Cid, A., Kobayashi, S., Kawaguchi, S., et al. (2021) Mnfenigesi High-Entropy Alloy with Large Magnetocaloric Effect. *Journal of Alloys and Compounds*, **855**, Article 157424. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157424>
- [14] Law, J.Y., Díaz-García, Á., Moreno-Ramírez, L.M. and Franco, V. (2021) Increased Magnetocaloric Response of Femnigesi High-Entropy Alloys. *Acta Materialia*, **212**, Article 116931. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.116931>
- [15] Guo, Y., Zhang, T., Zhang, Z., Chen, B., Guo, W., Pan, S., et al. (2022) Large Reversible Magnetocaloric Effect in High-Entropy Mnfeconigesi System with Low-Hysteresis Magnetostructural Transformation. *APL Materials*, **10**, Article 091107. <https://doi.org/10.1063/5.0108367>
- [16] Kaul, S.N. (1985) Static Critical Phenomena in Ferromagnets with Quenched Disorder. *Journal of Magnetism and Magnetic*

-
- Materials*, **53**, 5-53. [https://doi.org/10.1016/0304-8853\(85\)90128-3](https://doi.org/10.1016/0304-8853(85)90128-3)
- [17] Stanley, H.E. (1999) Scaling, Universality, and Renormalization: Three Pillars of Modern Critical Phenomena. *Reviews of Modern Physics*, **71**, S358.
- [18] Ghosh, K., Lobb, C.J., Greene, R.L., Karabashev, S.G., Shulyatev, D.A., Arsenov, A.A., *et al.* (1998) Critical Phenomena in the Double-Exchange Ferromagnet $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$. *Physical Review Letters*, **81**, 4740-4743. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.81.4740>
- [19] Fan, J., Ling, L., Hong, B., Zhang, L., Pi, L. and Zhang, Y. (2010) Critical Properties of the Perovskite Manganite $\text{La}_{0.1}\text{Nd}_{0.6}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$. *Physical Review B*, **81**, Article 144426. <https://doi.org/10.1103/physrevb.81.144426>
- [20] Zhang, T., Gong, Y., Lu, Z., Bai, Y. and Xu, F. (2023) Critical Behavior at Ferromagnetic to Paramagnetic Phase Transition in Single Crystalline MnNiSi Ferromagnet. *Journal of Applied Physics*, **134**, Article 183901. <https://doi.org/10.1063/5.0176228>
- [21] Wang, Y., Lu, Z., Gong, Y., Wang, H. and Chen, F. (2025) Magnetic Properties and Critical Behaviors in Medium-Entropy Feconicr Alloys: Exploring the Relationship between Configurational Entropy and Critical Exponents. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **628**, Article 173155. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2025.173155>
- [22] Na, S., Yoo, J., Lambert, P.K. and Jones, N.J. (2017) Room-Temperature Ferromagnetic Transitions and the Temperature Dependence of Magnetic Behaviors in Feconicr-Based High-Entropy Alloys. *AIP Advances*, **8**, Article 056412. <https://doi.org/10.1063/1.5007073>
- [23] Nartu, M.S.K.K.Y., Jagetia, A., Chaudhary, V., Mantri, S.A., Ivanov, E., Dahotre, N.B., *et al.* (2020) Magnetic and Mechanical Properties of an Additively Manufactured Equiatomic Cofeni Complex Concentrated Alloy. *Scripta Materialia*, **187**, 30-36. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2020.05.063>