

Fe含量对Fe-Mn-Ga合金相演化与热、力学性能的影响

陈希南, 谷鹏程, 曾维俊, 李泽博, 杨思宇, 宦薛雯, 缪雪飞*

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2月25日; 录用日期: 2026年3月18日; 发布日期: 2026年3月30日

摘要

以 $\text{Fe}_{43}\text{Mn}_{28}\text{Ga}_{29}$ (FMG0)合金为基体, 通过过量Fe制备了 $\text{Fe}_{49}\text{Mn}_{28}\text{Ga}_{29}$ (FMG1)与 $\text{Fe}_{55}\text{Mn}_{28}\text{Ga}_{29}$ (FMG2)合金, 研究了Fe含量对相组成、热膨胀行为及力学性能的影响。XRD与SEM/EDS结果表明: 随Fe含量增加, 合金由FMG0的BCC (B2)单相逐步向BCC + FCC (γ)双相(FMG1)及FCC单相(FMG2)转变。热膨胀测试显示, FMG1仍保持负热膨胀(NTE)特征, 负热膨胀区间为200~300 K, 线膨胀系数 $\alpha = -77.9$ ppm/K; FMG2为稳定FCC单相, 表现为正热膨胀($\alpha = 14.5$ ppm/K)。室温压缩结果表明, 随FCC相增加, 材料强塑性显著提升: FMG2压缩强度达1013 MPa, 且无明显开裂, 呈现优良塑性变形能力。DSC分析进一步证实, FMG1的负热膨胀与可逆相变对应, 而FCC单相的FMG2未出现显著相变峰。上述结果表明, 通过Fe含量调控可实现Fe-Mn-Ga合金由“负热膨胀功能型”向“结构-功能一体化”的性能转变, 为该体系的成分设计与性能协同提供了依据。

关键词

Fe-Mn-Ga合金, 相变, 负热膨胀, 力学性能, FCC相

Influence of Fe Content on Phase Evolution, Thermal and Mechanical Properties of Fe-Mn-Ga Alloys

Xinan Chen, Pengcheng Gu, Weijun Zeng, Zebo Li, Siyu Yang, Xuewen Huan, Xuefei Miao*

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

Received: February 25, 2026; accepted: March 18, 2026; published: March 30, 2026

*通讯作者。

文章引用: 陈希南, 谷鹏程, 曾维俊, 李泽博, 杨思宇, 宦薛雯, 缪雪飞. Fe含量对Fe-Mn-Ga合金相演化与热、力学性能的影响[J]. 材料科学, 2026, 16(4): 18-25. DOI: 10.12677/ms.2026.164068

Abstract

Based on the $\text{Fe}_{43}\text{Mn}_{28}\text{Ga}_{29}$ (FMG0) alloy, $\text{Fe}_{49}\text{Mn}_{28}\text{Ga}_{29}$ (FMG1) and $\text{Fe}_{55}\text{Mn}_{28}\text{Ga}_{29}$ (FMG2) alloys were prepared by introducing excess Fe, and the effects of Fe content on phase constitution, thermal expansion behavior, and mechanical properties were investigated. XRD and SEM/EDS results indicate that with increasing Fe content, the alloy evolves from a single BCC (B2) phase in FMG0 to a BCC + FCC (γ) dual-phase structure in FMG1 and further to a single FCC phase in FMG2. Thermal expansion measurements show that FMG1 still exhibits negative thermal expansion (NTE) over 200~300 K with a linear thermal expansion coefficient of $\alpha = -77.9$ ppm/K, whereas FMG2, as a stable single FCC phase, displays positive thermal expansion ($\alpha = 14.5$ ppm/K). Room-temperature compression tests reveal that increasing the FCC phase fraction markedly improves the strength-ductility performance: FMG2 achieves a compressive strength of 1013 MPa without obvious cracking, demonstrating excellent plastic deformability. DSC analysis further confirms that the NTE in FMG1 corresponds to a reversible phase transformation, while no pronounced transformation peak is observed for the single-FCC FMG2. These results suggest that Fe-content tuning can drive a performance transition in Fe-Mn-Ga alloys from “NTE-functional” behavior toward “structure-function integration,” providing a basis for composition design and performance synergy in this alloy system.

Keywords

Fe-Mn-Ga Alloy, Phase Transformation, Negative Thermal Expansion, Mechanical Properties, FCC Phase

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

负热膨胀(negative thermal expansion, NTE)材料在升温过程中表现出体积或长度收缩, 可用于精密仪器、光学器件、航空航天结构及温度补偿构件等领域, 通过与正热膨胀材料复合实现近零热膨胀, 从而提升系统尺寸稳定性与服役可靠性[1]-[3]。与传统氧化物 NTE 材料相比, 金属/合金体系通常具有更高的热导率、更优的加工成形性以及更好的力学承载潜力, 因此近年来受到广泛关注[4]。其中, Fe-Mn-Ga 合金因其丰富的相变行为与可观的热膨胀可调性, 被认为是一类具有应用前景的结构-功能候选材料体系[5]。

Fe-Mn-Ga 合金在不同成分与热处理条件下可呈现多种相结构与组织形态, 常见晶体结构主要包括 BCC(B2)与 FCC(γ)两类。已有研究表明, BCC 相关组织往往与低温区的异常热膨胀行为(包括 NTE)及可逆相变过程存在关联; 然而, BCC 相在室温下通常塑性不足、韧性较差, 易发生脆性断裂, 从而限制了其工程应用[6]。相较之下, FCC 相具有较高的滑移系数与更好的塑性变形能力, 通常表现出更优的强韧性与加工适应性, 而合金体系中典型的低热膨胀行为(如 Invar 效应)也表明金属相结构与热膨胀响应密切相关[7]; 但在 Fe-Mn-Ga 体系中, FCC 相往往更倾向呈现常规正热膨胀特征。因此, 如何在维持或调控负热膨胀功能的同时提升力学性能, 实现热膨胀功能与结构承载能力的协同, 是 Fe-Mn-Ga 合金研究中的关键科学问题与应用瓶颈[8]。

针对上述矛盾, 构建双相组织被认为是一种可行的结构-功能协同策略: 一方面, 具备相变/异常热膨胀特征的相可提供功能贡献; 另一方面, 塑性更好的相可在变形过程中承担应力、钝化裂纹并改善整体韧性, 从而实现性能互补[9]。同时, 复合/多相化调控热膨胀是实现近零热膨胀的重要工程途径, 金属

基复合材料中引入强 NTE 相以实现热膨胀匹配的思路亦已得到验证[10] [11]。此外，双相界面、相间约束以及由此产生的内应力场也可能影响相变行为与热膨胀响应，使负热膨胀的温域、幅值及可逆性发生调控[12]。因此，通过成分设计实现“BCC→BCC + FCC→FCC”的可控相演化，并系统阐明其对热膨胀与力学性能的影响规律，对于该体系的材料设计具有重要意义[13]。

已有报道指出， $\text{Fe}_{43}\text{Mn}_{28}\text{Ga}_{29}$ 合金在特定热处理态下可获得 BCC 单相并呈现典型负热膨胀行为，但其脆性特征仍制约了应用推广[6]。值得注意的是，除相变型 NTE 外，氧化物体系中亦存在代表性的晶格振动型 NTE 材料(如 ZrW_2O_8) 及其相关机理研究[14] [15]，以及由横向振动模式主导的 ScF_3 等材料体系[16] [17]，提示负热膨胀可由不同微观机制产生。基于此，本研究以 $\text{Fe}_{43}\text{Mn}_{28}\text{Ga}_{29}$ (记为 FMG0)为对照，通过过量添加 Fe 元素设计制备 FMG1 与 FMG2 两种合金，围绕“成分调控 - 相结构演化 - 热膨胀/力学响应”的内在关联开展系统研究。本文结合 XRD、SEM/EDS、热膨胀测试、DSC 及室温压缩实验，比较不同 Fe 含量下相组成与组织特征的变化，揭示双相组织对负热膨胀温域与幅值的影响规律，并进一步讨论 FCC 相引入对合金强塑性的提升作用。该研究旨在为 Fe-Mn-Ga 合金由“负热膨胀功能型”向“结构 - 功能一体化”方向的成分设计与性能协同提供实验依据与思路参考。

2. 实验

本研究以高纯度(纯度 > 99.9 wt%)的 Fe、Mn、Ga 单质为原料，采用电弧熔炼制备名义成分为 $\text{Fe}_{49}\text{Mn}_{28}\text{Ga}_{29}$ (FMG1)与 $\text{Fe}_{55}\text{Mn}_{28}\text{Ga}_{29}$ (FMG2)的合金锭。熔炼过程在氩气(Ar)保护气氛下进行，并通过 4~5 次反复熔炼确保合金成分均匀性；随后采用喷铸成型工艺将熔融的合金注入直径 4 mm 的圆柱形铜模具中，使其快速凝固，获得各向异性的棒状合金样品。为进一步改善组织的均匀性，将棒状合金真空密封于石英管中，置于马弗炉中在 1273 K 温度下保温 4 h 后淬火。最终获得成分均匀的棒状合金。

对制备得到的合金样品进行系统表征。首先，使用 X 射线衍射仪(X-ray diffraction, XRD, Bruker-AXS D8 Advance)分析其晶体结构，扫描角度范围设定为 $2\theta = 20^\circ \sim 90^\circ$ ，步长为 0.01° ，每步停留 2 s，以确定样品的晶格结构及相组成。其次，采用场发射扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM, Talos F200X)观察合金的显微形貌，并结合能谱分析仪(Energy Dispersive Spectrometer, EDS)检测元素分布及组分均匀性；接着，利用热膨胀仪(Linseis DIL L75 VS)测试样品的热膨胀性能；最后，采用万能材料试验机(INSTRON 5969 型)测试材料的力学性能参数。文中 FMG0 ($\text{Fe}_{43}\text{Mn}_{28}\text{Ga}_{29}$)部分热膨胀与力学数据引用公开文献结果作为对照。

3. 结果与讨论

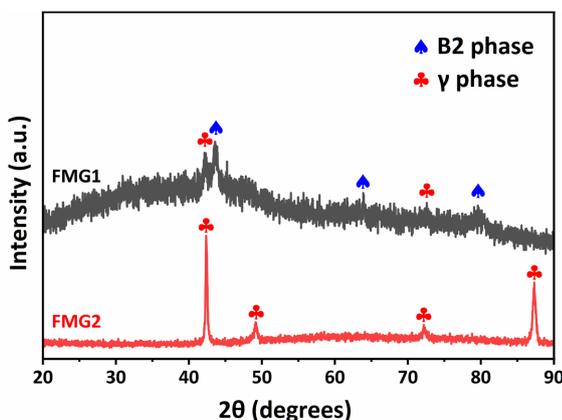


Figure 1. XRD patterns of Fe-Mn-Ga alloys with different Fe contents
图 1. 不同 Fe 含量 Fe-Mn-Ga 合金的 XRD 谱图

图 1 为不同成分样品的 XRD 结果。文献报道的 $\text{Fe}_{43}\text{Mn}_{28}\text{Ga}_{29}$ 为单相 BCC (B2) 结构[6]；随 Fe 含量提高，FMG1 出现 BCC 与 FCC (γ) 两类衍射峰，表明形成双相组织；当 Fe 含量提升至 55 at% (FMG2) 时，仅观察到 FCC 相衍射峰，说明合金转变为 FCC 单相。上述结果表明，过量 Fe 的引入可显著促进 FCC 相稳定化。

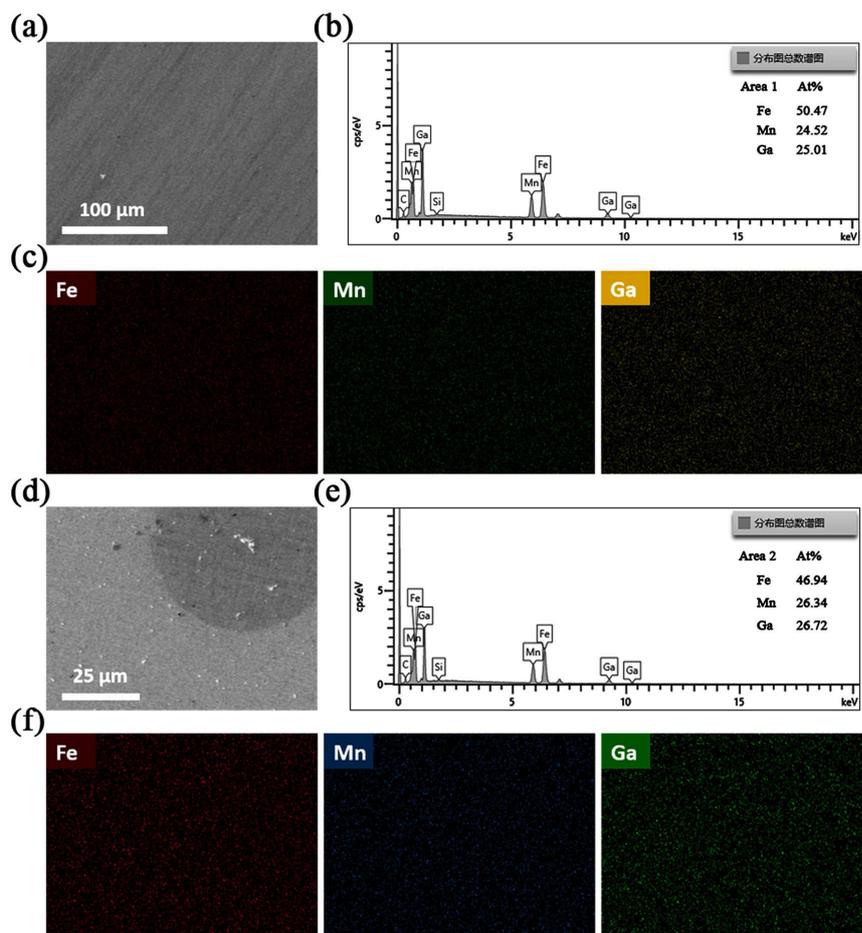


Figure 2. SEM morphology and EDS mapping results of FMG1
图 2. FMG1 的 SEM 形貌与 EDS 面扫结果

FMG1 样品的 SEM/EDS 结果表明其显微组织呈现双相共存特征。如图 2(a) 所示，样品在该视场内整体衬度较为均一；而在图 2(d) 中可观察到与周围基体衬度不同的局部区域，表明样品内部存在成分(或相)分区。对应的 EDS 能谱与定量结果见图 2(b)~(e)：两类区域的化学成分分别约为 $\text{Fe}_{50.47}\text{Mn}_{24.52}\text{Ga}_{25.01}$ 与 $\text{Fe}_{46.94}\text{Mn}_{26.34}\text{Ga}_{26.72}$ (at%)，显示两相在 Fe、Mn、Ga 含量上具有可区分的差异，其中基体相 Fe 含量相对更高，而另一相相对富集 Mn 与 Ga。进一步地，元素面分布结果(图(c)~(f))与 SEM 衬度区域在空间上相互对应，证实不同衬度区域具有一致的元素富集/贫化特征。综上所述，FMG1 样品由两种成分不同的相组成，形成典型的双相共存组织。

图 3 所示为 FMG2 在背散射电子模式下的典型微观形貌，合金的微观组织整体均匀、致密，呈现出单一且均匀的灰色衬度。均匀的衬度表明在所测试的微米尺度下不存在平均原子序数存在显著差异的第二相或析出物。同时，图像中也没有观察到明显的孔洞、裂纹或疏松等缺陷，这表明所采用的真空电弧熔炼工艺成功制备出了高致密度、高质量的合金铸锭，为获得本征的材料性能提供了保障。

为了在更微观的尺度上验证元素的分布均匀性并确认物相组成,我们对同一区域进行了 EDS 面扫描分析,结果如图 3(b)、图 3(c)所示。Fe、Mn、Ga 三种元素的分布图显示,各元素在扫描区域内都呈现高度均匀的分布,没有出现任何元素偏聚或富集的现象。需要指出的是,EDS 获得的平均成分(约 $\text{Fe}_{52.5}\text{Mn}_{23.2}\text{Ga}_{24.3}$)与名义成分存在一定偏差,可能与熔炼/热处理过程中元素挥发、烧损或偏析有关;该偏差不影响其在 XRD 与 SEM 中表现出的 FCC 单相特征。

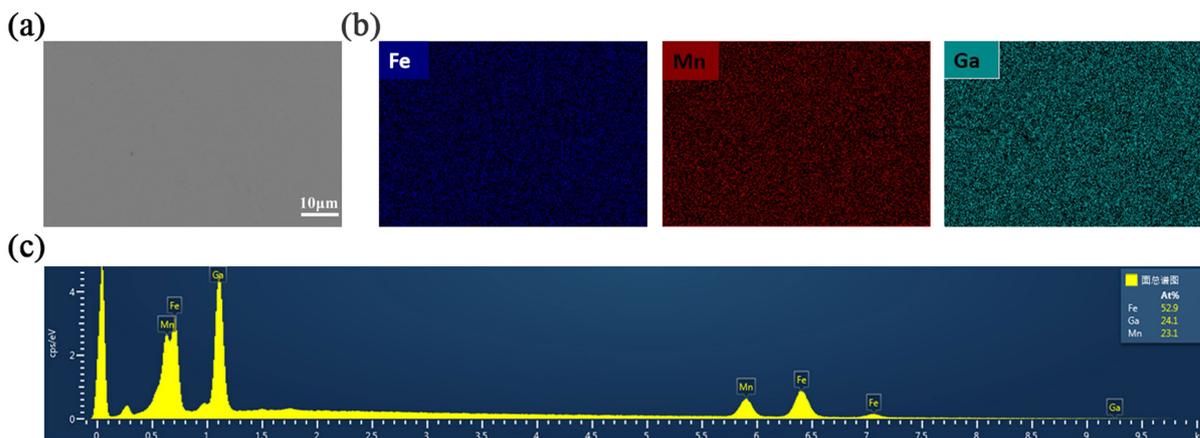


Figure 3. SEM morphology and EDS mapping results of FMG2

图 3. FMG2 的 SEM 形貌与 EDS 面扫结果

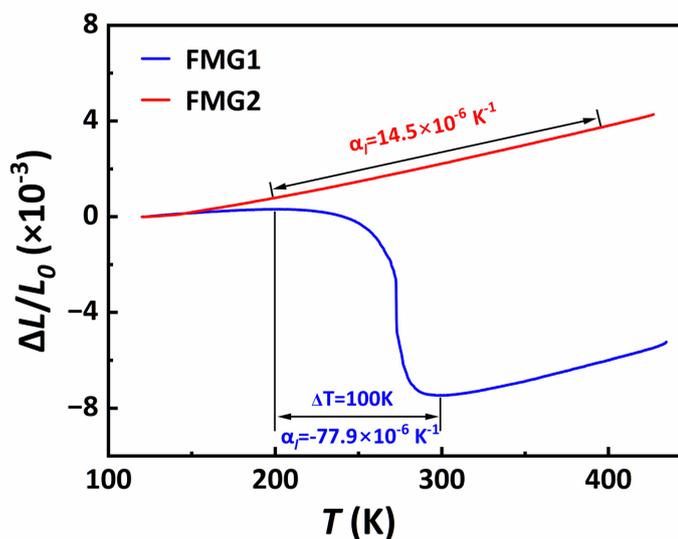


Figure 4. Thermal expansion curves of FMG1 and FMG2

图 4. FMG1、FMG2 的热膨胀曲线

文献报道 FMG0 ($\text{Fe}_{43}\text{Mn}_{28}\text{Ga}_{29}$)合金在 209~290 K 温度范围内呈现负热膨胀(NTE)行为,其线膨胀系数 α 为 -50.2 ppm/K [6]。图 4 对比了 FMG1 与 FMG2 样品的热膨胀响应:FMG1 在约 200~300 K 范围内表现出显著的负热膨胀特征,对应的 α 为 -77.9 ppm/K 。相较于 FMG0,FMG1 的负热膨胀温域进一步拓宽,且 $|\alpha|$ 增大,说明其负热膨胀效应得到增强,结合前述组织结果,推测双相结构可能通过相间耦合/协同变形作用促进了负热膨胀的产生与强化。相比之下,FMG2 样品在测试温区内表现为典型的正热膨胀行为, α 为 14.5 ppm/K ,且曲线未观察到明显的热滞现象,表明其热膨胀过程较为可逆稳定。

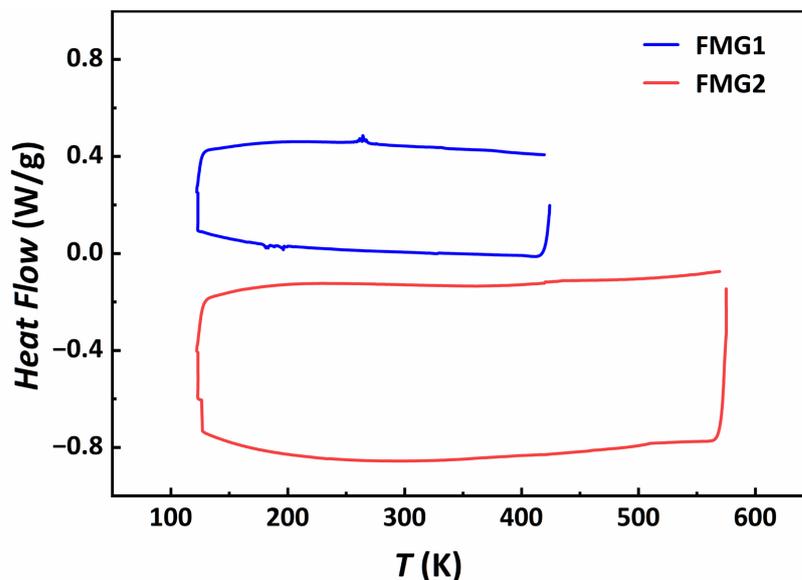


Figure 5. DSC curves (heating/cooling) of FMG1 and FMG2

图 5. FMG1 与 FMG2 的 DSC 曲线(升温/降温)

图 5 为 DSC 结果。FMG1 在升温与降温过程中均出现清晰的吸/放热峰，表明存在可逆相变；结合图 4 可知，负热膨胀与该相变区间高度对应。FMG2 在测试温区内未出现明显热效应峰，与其稳定 FCC 单相及正热膨胀行为一致。

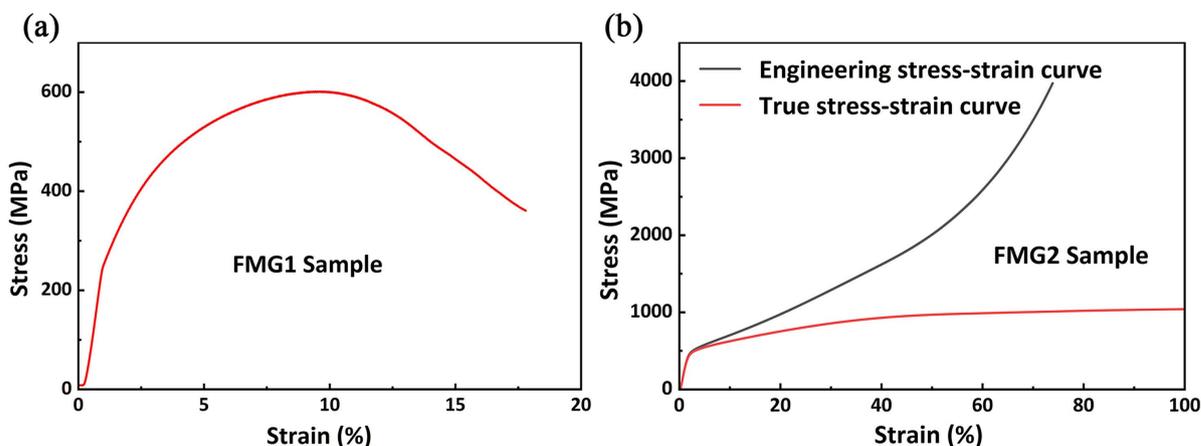


Figure 6. Room temperature compressive stress-strain curves of FMG1 and FMG2

图 6. FMG1、FMG2 室温压缩应力 - 应变曲线

图 6 展示了合金在室温下的压缩应力 - 应变曲线。文献报道，FMG0 的压缩强度约为 517 MPa，极限应变约为 6.7%，表现出明显的脆性断裂特征[6]。相比之下，FMG1 的压缩强度提高至约 600 MPa，极限应变增至约 9.5%，韧性有所改善，但仍存在一定程度的脆性破坏。进一步增加 Fe 含量后，FMG2 的压缩强度显著提升至 1013 MPa (约为 FMG0 的 2 倍)，且在压缩过程中未观察到明显开裂现象，表现出优异的塑性变形能力。

上述结果表明，随着 Fe 含量的增加，FCC 相得到稳定并逐渐占主导地位，从而显著优化了合金的强度-塑性匹配，有效缓解了 BCC 相主导时所带来的脆性问题。

4. 结论

(1) 在 $\text{Fe}_{43}\text{Mn}_{28}\text{Ga}_{29}$ (FMG0, BCC 单相)基础上, 通过过量添加 Fe 可有效调控 Fe-Mn-Ga 合金的相组成: $\text{Fe}_{49}\text{Mn}_{28}\text{Ga}_{29}$ (FMG1)为 BCC + FCC 双相, $\text{Fe}_{55}\text{Mn}_{28}\text{Ga}_{29}$ (FMG2)为 FCC 单相。

(2) 热膨胀行为随相结构发生显著变化: FMG0 表现负热膨胀(209~290 K, $\alpha = -50.2$ ppm/K); FMG1 负热膨胀更显著且温域更宽(200~300 K, $\alpha = -77.9$ ppm/K); FMG2 为正热膨胀($\alpha = 14.5$ ppm/K)。

(3) 随 FCC 相比比例增加, 室温压缩强塑性显著提升: FMG2 压缩强度达 1013 MPa, 塑性变形能力明显优于 FMG0 (517 MPa, 6.7%), 体现出热膨胀特性与力学性能之间的权衡关系及其可调控性。

(4) DSC 结果表明, FMG1 的负热膨胀与可逆相变密切对应; FCC 单相 FMG2 未见明显相变峰, 因此不表现负热膨胀效应。

综上, 本研究表明通过 Fe 含量调控相组成与相变行为, 可为在 Fe-Mn-Ga 合金中进一步探索“热膨胀—力学性能”综合指标的优化提供实验依据与可行路径, 但仍需在成分设计、组织调控与服役温区匹配等方面开展进一步研究以实现更全面的性能协同。

基金项目

本研究受到了南京理工大学大学生创新创业训练计划立项资助(国家级, 项目编号 202510288012)的经费支持。

参考文献

- [1] Sleight, A.W. (1998) Isotropic Negative Thermal Expansion. *Annual Review of Materials Science*, **28**, 29-43. <https://doi.org/10.1146/annurev.matsci.28.1.29>
- [2] Takenaka, K. (2012) Negative Thermal Expansion Materials: Technological Key for Control of Thermal Expansion. *Science and Technology of Advanced Materials*, **13**, Article ID: 013001. <https://doi.org/10.1088/1468-6996/13/1/013001>
- [3] Chen, J., Hu, L., Deng, J. and Xing, X. (2015) Negative Thermal Expansion in Functional Materials: Controllable Thermal Expansion by Chemical Modifications. *Chemical Society Reviews*, **44**, 3522-3567. <https://doi.org/10.1039/c4cs00461b>
- [4] Mary, T.A., Evans, J.S.O., Vogt, T. and Sleight, A.W. (1996) Negative Thermal Expansion from 0.3 to 1050 Kelvin in ZrW_2O_8 . *Science*, **272**, 90-92. <https://doi.org/10.1126/science.272.5258.90>
- [5] Omori, T., Watanabe, K., Umetsu, R.Y., Kainuma, R. and Ishida, K. (2009) Martensitic Transformation and Magnetic Field-Induced Strain in Fe-Mn-Ga Shape Memory Alloy. *Applied Physics Letters*, **95**, Article ID: 082508. <https://doi.org/10.1063/1.3213353>
- [6] Sun, X.M., Cong, D.Y., Ren, Y., Brown, D.E., Li, R.G., Li, S.H., *et al.* (2018) Giant Negative Thermal Expansion in Fe-Mn-Ga Magnetic Shape Memory Alloys. *Applied Physics Letters*, **113**, Article ID: 041903. <https://doi.org/10.1063/1.5038860>
- [7] Takenaka, K. (2024) Giant Negative Thermal Expansion Materials: Progress of Research and Future Prospects. *Materials Transactions*, **65**, 243-252. <https://doi.org/10.2320/matertrans.mt-y2023008>
- [8] Sun, X.M., Cong, D.Y., Ren, Y., Brown, D.E., Gallington, L.C., Li, R.G., *et al.* (2021) Enhanced Negative Thermal Expansion of Boron-Doped $\text{Fe}_{43}\text{Mn}_{28}\text{Ga}_{28.97}\text{B}_{0.03}$ Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, **857**, Article ID: 157572. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157572>
- [9] Wang, J., Gong, Y., Liu, J., Miao, X., Xu, G., Chen, F., *et al.* (2018) Balancing Negative and Positive Thermal Expansion Effect in Dual-Phase $\text{La}(\text{Fe},\text{Si})_{13}/\alpha\text{-Fe}$ *In-Situ* Composite with Improved Compressive Strength. *Journal of Alloys and Compounds*, **769**, 233-238. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.07.349>
- [10] Sahoo, A. and Medicherla, V.R.R. (2021) Fe-Ni Invar Alloys: A Review. *Materials Today: Proceedings*, **43**, 2242-2244. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.527>
- [11] Takenaka, K., Hamada, T., Kasugai, D. and Sugimoto, N. (2012) Tailoring Thermal Expansion in Metal Matrix Composites Blended by Antiperovskite Manganese Nitrides Exhibiting Giant Negative Thermal Expansion. *Journal of Applied Physics*, **112**, Article ID: 083517. <https://doi.org/10.1063/1.4759121>
- [12] Zhou, C., Tang, Z., Kong, X., Zhou, Y., Liao, M., Qian, J., *et al.* (2024) High-Performance Zero Thermal Expansion in

-
- Al Metal Matrix Composites. *Acta Materialia*, **275**, Article ID: 120076. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2024.120076>
- [13] Guimarães, C.E.A., Krohling, A.C., Larica, C., Scopel, W.L. and Passamani, E.C. (2019) Structural Phase Transition in Al-Substituted Fe₂MnGa Heusler Alloy. *Journal of Applied Physics*, **125**, Article ID: 075105. <https://doi.org/10.1063/1.5084333>
- [14] Neely, L.A., Kochergin, V., See, E.M. and Robinson, H.D. (2013) Negative Thermal Expansion in a Zirconium Tungstate/Epoxy Composite at Low Temperatures. *Journal of Materials Science*, **49**, 392-396. <https://doi.org/10.1007/s10853-013-7716-8>
- [15] Tucker, M.G., Goodwin, A.L., Dove, M.T., Keen, D.A., Wells, S.A. and Evans, J.S.O. (2005) Negative Thermal Expansion in ZrW₂O₈: Mechanisms, Rigid Unit Modes, and Neutron Total Scattering. *Physical Review Letters*, **95**, Article ID: 255501. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.95.255501>
- [16] Li, C.W., Tang, X., Muñoz, J.A., Keith, J.B., Tracy, S.J., Abernathy, D.L., *et al.* (2011) Structural Relationship between Negative Thermal Expansion and Quartic Anharmonicity of Cubic ScF₃. *Physical Review Letters*, **107**, Article ID: 195504. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.107.195504>
- [17] Greve, B.K., Martin, K.L., Lee, P.L., Chupas, P.J., Chapman, K.W. and Wilkinson, A.P. (2010) Pronounced Negative Thermal Expansion from a Simple Structure: Cubic ScF₃. *Journal of the American Chemical Society*, **132**, 15496-15498. <https://doi.org/10.1021/ja106711v>