Material Sciences 材料科学, 2026, 16(11), 1-6
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/ms
https://doi.org/10.12677/ms.2026.1611204

Hans汉斯

高强度零热膨胀复合材料的制备与性能研究

孙甜甜[1]，周文俊[1]，李彦静[1]，秦曼如[1]，杜建翔[1]，程俊峰[2]，林建强[2]，缪雪飞[1*]，徐　锋[1]

[1]南京理工大学材料科学与工程学院，江苏　南京
[2]宁波招宝磁业股份有限公司，浙江　宁波

收稿日期：2026年9月28日；录用日期：2026年10月23日；发布日期：2026年11月4日

摘　要

零热膨胀材料在温度变化过程中表现出优异的尺寸稳定性，在精密仪器、光学系统等关键领域具有重要的应用价值。具有优异磁体积效应的Ho_2Fe_{17}合金是极具潜力的负热膨胀材料，与正热膨胀材料复合后可实现零热膨胀，但其固有的本征脆性大且零热膨胀温域较窄，严重限制了其工程化应用进程。为了解决此问题，本研究利用电弧熔炉法制备了不同Cu含量的Ho_2Fe_{17}/Cu复合材料，借助热膨胀仪、万能试验机、扫描电子显微镜、能谱分析仪及振动样品磁强计等仪器，系统研究了材料的热膨胀系数、抗压强度、微观结构及磁相变行为。研究表明，12 wt.% Cu掺杂的Ho_2Fe_{17}/Cu复合材料在120~352 K的温区内的热膨胀系数低至0.51 ppm/K，抗压强度高达0.98 GPa，在精密仪器等领域展现出良好的应用前景。

关键词

Ho_2Fe_{17}合金，零热膨胀，磁相变，压缩强度

Preparation and Properties of Zero-Thermal-Expansion Composites

Tiantian Sun[1], Wenjun Zhou[1], Yanjing Li[1], Manru Qin[1], Jianxiang Du[1], Junfeng Cheng[2], Jianqiang Lin[2], Xuefei Miao[1*], Feng Xu[1]

[1]School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu
[2]Ningbo Zhaobao Magnet Co., Ltd., Ningbo Zhejiang

Received: September 28, 2026; accepted: October 23, 2026; published: November 4, 2026

Abstract

Zero-thermal-expansion materials exhibit excellent dimensional stability during temperature

*通讯作者。

文章引用: 孙甜甜, 周文俊, 李彦静, 秦曼如, 杜建翔, 程俊峰, 林建强, 缪雪飞, 徐锋. 高强度零热膨胀复合材料的制备与性能研究[J]. 材料科学, 2026, 16(11): 1-6. DOI: 10.12677/ms.2026.1611204

changes and are of significant practical value in critical fields such as precision instruments and optical systems. The Ho_2Fe_{17} alloy, which possesses an outstanding magnetic volume effect, is a highly promising negative-thermal-expansion material; when combined with a positive-thermal-expansion material, it can achieve zero thermal expansion. However, its inherent high brittleness and narrow zero-thermal-expansion temperature range severely limit its engineering applications. To address this issue, this study prepared Ho_2Fe_{17}/Cu composites with different Cu contents by arc melting. Using instruments such as a thermal expansion analyzer, universal testing machine, scanning electron microscope, energy dispersive spectrometer and vibrating sample magnetometer, the thermal expansion coefficient, compressive strength, microstructure and magnetic phase transition behaviour of the material were systematically investigated. The study indicates that the Ho_2Fe_{17}/Cu composite containing 12 wt.% Cu exhibits a thermal expansion coefficient as low as 0.51 ppm/K within the temperature range of 120~352 K, with a compressive strength as high as 0.98 GPa, demonstrating excellent application prospects in high-precision and cutting-edge fields such as precision instrumentation.

Keywords

Ho_2Fe_{17}/Cu, Zero Thermal Expansion, Magnetic Phase Transition, Compressive Strength

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

金属材料在温度变化时通常会产生热胀冷缩，其根本原因在于原子的非简谐振动[1]，从而在宏观层面表现出正热膨胀行为。在航空航天、精密光学仪器及电子封装等高端技术领域，由温度诱导的尺寸不稳定性往往会导致界面应力激增、结构形变乃至装配精度丧失[2]。为应对这一严峻挑战，研发出兼具高强度与零热膨胀系数的金属合金材料成为关键[3]。零热膨胀材料的探索可追溯至 1897 年 Guillaume 发现的因瓦合金，此后，研究者们相继揭示了在金属材料中诱发低热膨胀或负热膨胀行为的多种物理机制，如磁体积效应、相变体积效应及晶格畸变等[4]-[7]。

其中，具有优异磁体积效应(Magnetovolume Effect, MVE)的稀土－过渡金属间化合物备受关注。Ho_2Fe_{17} 合金因具有宽温域的线性负热膨胀行为，成为极具潜力的零热膨胀候选材料[8]。其通过改变温度，产生铁磁顺磁转变，基体相表现为负热膨胀，可以有效中和常规材料在升温过程中的晶格膨胀，从而消除因温度波动导致的尺寸失配。然而，Ho_2Fe_{17} 基合金的实际应用面临着重大瓶颈：该类金属间化合物固有的本征脆性使其难以进行常规的加工成形，且在加工过程中极易开裂，抗压强度较低[9] [10]。此外，稀土－过渡金属间化合物通常还面临高成本等潜在劣势，如何在 Ho_2Fe_{17} 基合金中同时兼顾宽温域零热膨胀、高抗压强度以及良好的加工性与低成本，是该体系走向工程化亟待解决的核心问题。

鉴于此，本研究通过在脆性 Ho_2Fe_{17} 基体中引入塑性 Cu 相，旨在同时获得零热膨胀与高强度，为开发兼具高抗压强度与宽温域零热膨胀特性的新型功能结构一体化材料提供实验依据与理论参考。

2. 实验

本研究首先以高纯度(纯度 > 99.9 wt.%)的 Ho、Fe、Cu 单质为原料，采用电弧熔炼的方法制备了不同 Cu 含量的 Ho_2Fe_{17}/Cu 铸锭。熔炼过程在高纯保护气氛氩气(Ar)的环境下通过，样品均翻面熔炼 3 遍以

确保复合材料成分均匀。而后将熔炼获得的铸锭封入真空石英管内，并放置于马弗炉内进行等温退火处理(1373 K，5 天)，而后淬火至冷水中获得 Ho_2Fe_{17}/Cu 合金样品。

对制备得到的 Ho_2Fe_{17}/Cu 复合材料进行系统表征。利用热膨胀仪(DIL，L75VS 型热膨胀仪)测试复合材料的热膨胀性能。采用万能试验机(Instron-5969 型)进行压缩试验，测试复合材料的力学性能参数。采用场发射扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)观察 Ho_2Fe_{17}/Cu 复合材料的微观形貌，并结合能谱分析仪(Energy Dispersive Spectrometer, EDS)检测元素分布及组分均匀性。此外，通过振动样品磁强计(Vibrating Sample Magnetometer, VSM)对样品进行磁性测量。

3. 结果与讨论

图 1 展示了不同铜含量的 Ho_2Fe_{17}/Cu 合金的横向(TD)热膨胀曲线。基体相 Ho_2Fe_{17} 具有负热膨胀特性，Cu 相呈现正热膨胀特性，二者复合后，该合金在铜含量为 8 wt.%时表现出强烈的负热膨胀(NTE)；随着铜含量的增加，热膨胀系数增加，热膨胀行为从 8 wt.% Cu 的负热膨胀(NTE)转变为 12 wt.% Cu 时的近零热膨胀(ZTE)，值得注意的是其在 120-352K 的温区内的线膨胀系数仅为 α_L = 0.51ppm/K，展现出优异的宽温域零热膨胀性能。

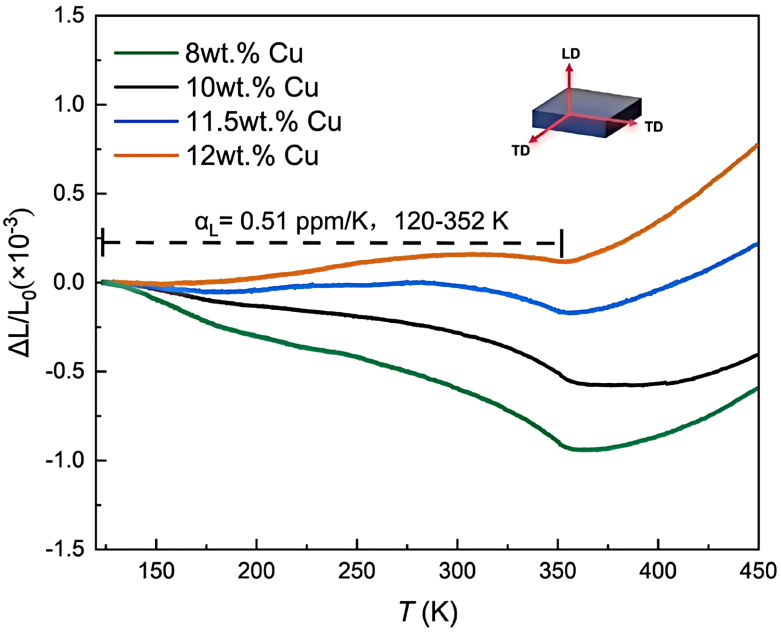


Figure 1. Transverse (TD) thermal expansion curves of Ho_2Fe_{17}/Cu alloys with varying copper content

图 1. 不同铜含量的 Ho_2Fe_{17}/Cu 合金横向(TD)热膨胀曲线(插图为测试方向)

图 2 为不同含铜量 Ho_2Fe_{17}/Cu 零热膨胀合金的压缩应力－应变曲线。测试结果表明，所有样品在加载初期基本均表现为线性弹性变形。其中，8 wt.%、10 wt.%与 11.5 wt.%铜含量样品的极限抗压应力均在 0.8~0.9 GPa 便发生压缩失效，而 12 wt.% Cu 的合金样品，其抗压强度为 0.98 GPa，断裂应变为 3.51%，表现出更优异的抗压性能。证明铜相的引入可以有效阻止样品内部的裂纹扩展，对比可知，在本实验范围内适当提高镀铜含量能够有效提升 Ho_2Fe_{17} 基合金的抗压承载能力，可以满足更多场景需求。

结合热膨胀性能和抗压强度，12 wt.% Cu 的 Ho_2Fe_{17}/Cu 复合材料性能较为优异，在 120~352 K 的温区内的横向的线膨胀系数为 α_L = 0.51 ppm/K，抗压强度达到 0.98 GPa。

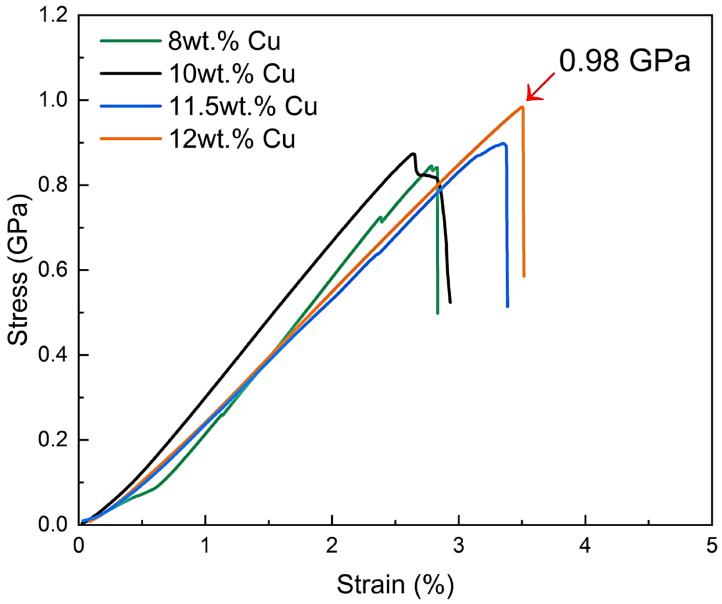


Figure 2. Typical compression stress-strain curves for Ho_2Fe_{17}/Cu composites with different copper contents
图 2. 不同铜含量的 Ho_2Fe_{17}/Cu 复合材料的典型压缩应力－应变曲线

为了探究 12 wt.% Cu 的 Ho_2Fe_{17}/Cu 复合材料的抗压强度提升机制，需要对其内部微观组织进行表征分析。图 3 是 12 wt.% Cu 的 Ho_2Fe_{17}/Cu 复合材料的 SEM 图像及 EDS 能谱。结合 SEM 图像和 EDS 能谱可知，图 3(a)中暗色部分是 Fe，灰色部分是 Ho_2Fe_{17}，亮色部分是 $HoCu_2$。Ho_2Fe_{17} 作为基体相，α-Fe 与 $HoCu_2$ 弥散分布在基体内部。EDS 面扫描结果显示，Fe 元素(绿色)大面积连续分布，对应 Ho_2Fe_{17} 基体与 α-Fe 相；Ho 元素(紫色)的富集区域对应 Ho_2Fe_{17} 基体和 $HoCu_2$ 相；Cu 元素(蓝色)信号主要集中在 $HoCu_2$ 析出区域，证实 Cu 与 Ho_2Fe_{17} 发生界面固相反应，生成 α-Fe 和 $HoCu_2$ 第二相，大量第二相引入产生丰富的异质相界面。这些丰富的相界面可以在裂纹扩展时消耗裂纹的能量，阻碍裂纹扩展，从而提高材料的抗压强度。

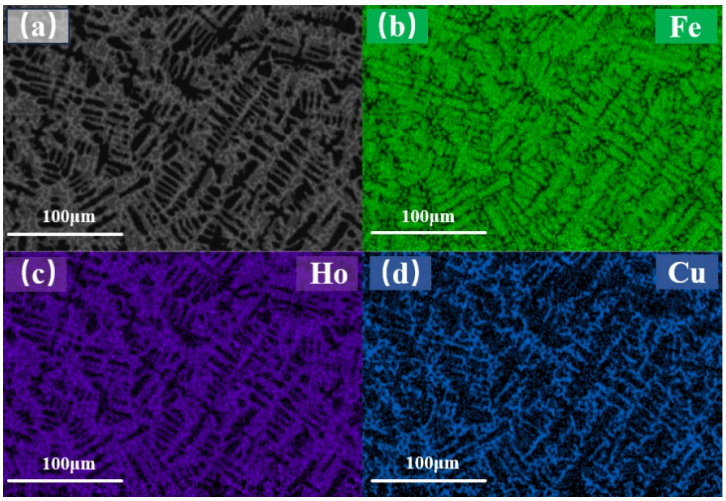


Figure 3. SEM images and EDS spectra of the Ho_2Fe_{17}/Cu composite containing 12 wt.% Cu
图 3. 12 wt.% Cu 的 Ho_2Fe_{17}/Cu 复合材料的 SEM 图像及 EDS 能谱

稀土基 Ho_2Fe_{17} 合金的负热膨胀来源于磁体积效应，与其磁性密切相关。为了探究 Cu 的引入对复合材料磁性的影响以及磁性和负热膨胀的关系，对 12 wt.% Cu 的 Ho_2Fe_{17}/Cu 复合材料样品的零场冷却(ZFC)和随场冷却(FC)的热磁曲线进行采集分析。图 4 为 12 wt.% Cu 的 Ho_2Fe_{17}/Cu 复合材料的 M-T 曲线。对于 12 wt.% Cu 的 Ho_2Fe_{17}/Cu 复合材料，热磁曲线在低温处出现了明显的分叉现象，ZFC 曲线磁化强度明显低于 FC 曲线，表明材料内部存在铁磁和反铁磁的竞争。随温度升高，反铁磁态的钉扎作用减弱，二者的差值逐渐缩小，在接近居里温度 T_C 附近时两条曲线趋于重合，磁化强度急剧下降，转变为顺磁态。12 wt.% Cu 的 Ho_2Fe_{17}/Cu 复合材料的 M-T 曲线特征与单相 Ho_2Fe_{17} 的 M-T 曲线特征类似，表明 Cu 的引入并未改变 Ho_2Fe_{17} 的磁性及本征的负热膨胀特征。

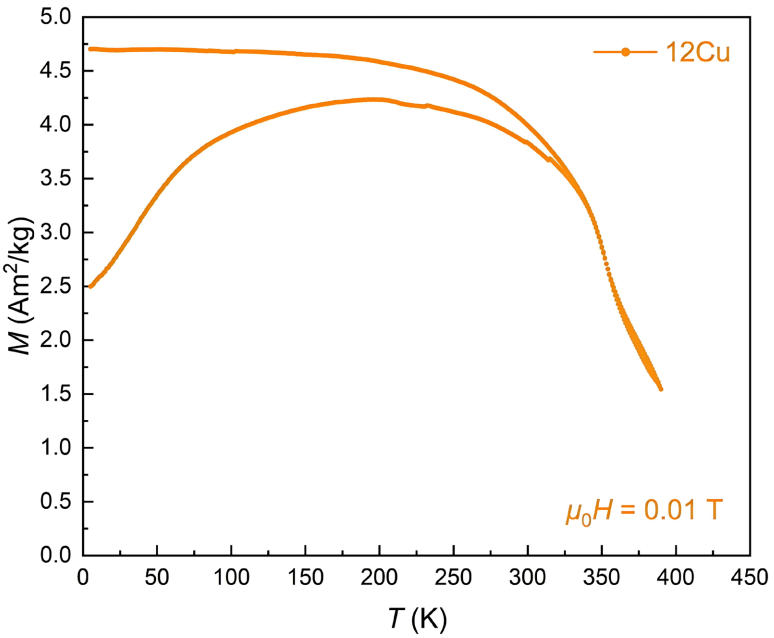


Figure 4. Magnetization curves of Ho_2Fe_{17}/Cu composite containing 12 wt.% Cu
图 4. 12 wt.% Cu 的 Ho_2Fe_{17}/Cu 复合材料的磁化曲线

4. 结论

本项目通过在 Ho_2Fe_{17} 脆性合金中引入不同含量的 Cu，成功制备出高强度宽温域的零热膨胀 Ho_2Fe_{17}/Cu 复合材料。该复合材料的铜含量为 12 wt.%，在 120~352 K 的温区内线膨胀系数为 $\alpha_L = 0.51$ ppm/K，实现近零热膨胀；抗压强度高达 0.98 GPa。有望运用在航空航天、精密光学仪器及电子封装等高端技术领域。

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(国家级，项目编号 202510288031)、中国博士后基金(2025T181126、2024M754143)经费支持。

参考文献

[1] Dugdale, J.S. and MacDonald, D.K.C. (1953) The Thermal Expansion of Solids. *Physical Review*, **89**, 832-834. https://doi.org/10.1103/physrev.89.832

[2] Liao, Y.F., Tegomo Chiogo, B., Clausse, T., *et al.* (2022) Dual Kondo Effect Charge Ordering and Zero Thermal Expansion in a Correlated Intermetallic. *Communications Materials*, **3**, Article No. 23. https://doi.org/10.1038/s43246-022-00243-5

[3] Liang, E., Sun, Q., Yuan, H., Wang, J., Zeng, G. and Gao, Q. (2021) Negative Thermal Expansion: Mechanisms and Materials. *Frontiers of Physics*, **16**, Article 53302. https://doi.org/10.1007/s11467-021-1070-0

[4] Mohn, P. (1999) A Century of Zero Expansion. *Nature*, **400**, 18-19. https://doi.org/10.1038/21778

[5] Qiu, B., Zhou, Y., Liang, H., Zhang, M., Gu, K., Zeng, T., *et al*. (2025) Negative Thermal Expansion and Oxygen-Redox Electrochemistry. *Nature*, **640**, 941-946. https://doi.org/10.1038/s41586-025-08765-x

[6] Song, Y., Shi, N., Deng, S., Xing, X. and Chen, J. (2021) Negative Thermal Expansion in Magnetic Materials. *Progress in Materials Science*, **121**, Article 100835. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100835

[7] 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

[8] Dan, S., Mukherjee, S., Mazumdar, C. and Ranganathan, R. (2016) Zero Thermal Expansion with High Curie Temperature in $Ho_2Fe_{16}Cr$ Alloy. *RSC Advances*, **6**, 94809-94814. https://doi.org/10.1039/c6ra20216k

[9] Zhou, H., Cao, Y., Yang, W., Avdeev, M., Wang, C., Sun, Y., *et al*. (2024) Axial Zero Thermal Expansion with Good Mechanical Strength in the Ni-Doped Kagome Ho_2Fe_{17} Magnets. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **16**, 69548-69555. https://doi.org/10.1021/acsami.4c14490

[10] Yu, C., Lin, K., Jiang, S., Cao, Y., Li, W., Wang, Y., *et al*. (2021) Plastic and Low-Cost Axial Zero Thermal Expansion Alloy by a Natural Dual-Phase Composite. *Nature Communications*, **12**, Article No. 4701. https://doi.org/10.1038/s41467-021-25036-1