

# DyHoErTm高熵合金的相组织和磁热性能研究

方凯<sup>1</sup>, 程思瑜<sup>1</sup>, 唐政煌<sup>1</sup>, 赵德伟<sup>2</sup>, 邵艳艳<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>南京理工大学材料科学与工程学院, 江苏 南京

<sup>2</sup>河北师范大学物理学院, 河北 石家庄

收稿日期: 2026年3月8日; 录用日期: 2026年4月1日; 发布日期: 2026年4月13日

## 摘要

氢气作为替代传统化石能源的清洁载体, 是构建绿色低碳能源体系的重要支柱。低温磁制冷技术凭借其高效、低能耗与环境友好的优势, 为氢气液化提供了变革性方案, 而高性能磁热材料的研发成为攻克该技术瓶颈的关键。尽管多种磁热材料已在不同温区展现出优异性能, 但工作温区狭窄、可调性差的共性问题, 仍严重制约其实际应用, 亟待解决。本文采用电弧熔炼法制备了DyHoErTm高熵合金, 研究了其相组成、微观形貌和磁相变行为。在5 T磁场下, 该合金最大磁熵变为 $8.63 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , 相对制冷功率达 $841.4 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 在液氢温区磁制冷领域具有良好的应用潜力。

## 关键词

DyHoErTm, 高熵合金, 磁相变, 磁熵变, 磁制冷

# Study on Phase Structure and Magnetocaloric Properties of DyHoErTm High-Entropy Alloy

Kai Fang<sup>1</sup>, Siyu Cheng<sup>1</sup>, Zhenghuang Tang<sup>1</sup>, Dewei Zhao<sup>2</sup>, Yanyan Shao<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu

<sup>2</sup>College of Physics, Hebei Normal University, Shijiazhuang Hebei

Received: March 8, 2026; accepted: April 1, 2026; published: April 13, 2026

## Abstract

Hydrogen, as a clean carrier to replace traditional fossil fuels, is a crucial pillar for building a green and low-carbon energy system. Low-temperature magnetic refrigeration technology, with

\*通讯作者。

文章引用: 方凯, 程思瑜, 唐政煌, 赵德伟, 邵艳艳. DyHoErTm 高熵合金的相组织和磁热性能研究[J]. 材料科学, 2026, 16(4): 110-117. DOI: 10.12677/ms.2026.164078

its advantages of high energy efficiency, low energy consumption, and environmental friendliness, offers a transformative solution for hydrogen liquefaction. The development of high-performance magnetocaloric materials has become key to overcoming the bottleneck of this technology. Although various magnetocaloric materials have demonstrated excellent performance in different temperature ranges, the common issues of narrow operating temperature ranges and poor adjustability severely constrain their practical application, demanding an urgent solution. This paper reports on a DyHoErTm high-entropy alloy prepared by arc melting, investigating its phase composition, microstructure, and magnetic phase transition behavior. Under a magnetic field of 5 T, this alloy exhibits a maximum magnetic entropy change of  $8.63 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  and a relative cooling power of  $841.4 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ , indicating promising potential for magnetic refrigeration applications in the liquid hydrogen temperature range.

## Keywords

DyHoErTm, High-Entropy Alloy, Magnetic Phase Transition, Magnetic Entropy Change, Magnetic Refrigeration

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

在我国能源转型背景下，液化气体因纯度高、储运效率高、经济性好等特点成为清洁能源发展的重要方向。根据《氢能产业发展中长期规划》，氢能是国家能源体系的重要组成部分[1]。然而，传统氢气液化设备能耗高(效率不足 10%)，成为制约产业发展的瓶颈。磁制冷技术凭借其低温能效优势，为破解这一储运难题提供了极具潜力的方案，其高效、环保的特性与清洁能源的发展理念高度契合，是未来替代传统气体压缩制冷、构建绿色氢能产业链的关键技术之一。

磁制冷技术是一种以磁性材料为核心工质的新型制冷方式，其核心原理是利用材料的磁热效应 (Magnetocaloric Effect, MCE) 实现能量转换[2]。而研发优良性能的磁热合金已成为实现磁制冷技术应用的核心突破口。近几十年来，研究人员致力于开发高性能低温磁制冷材料。其中重稀土元素(RE)因其大原子磁矩，展现出显著的磁热效应[3]。已有不少研究针对多种重稀土金属间化合物体系展开，例如 HER-TM-(C,Si) [4] [5]、HER-TM [6]和 HER-TM-O [7]等。此外，稀土高熵合金的设计理念通过多组元协同效应为调控磁性能提供了新途径，有望突破现有效率瓶颈。Yuan [8]等发现，在 GdDyHoErTb 高熵合金中表现出在 107 K 至 211 K 温度范围内的大磁热效应。Zhu [9]等发现 TbDyHoEr 高熵合金中顺磁 - 反铁磁和反铁磁 - 铁磁态的磁相变，带来了 Table-like 的磁热效应(55 K~184.5 K)，Shao 等[10]研究发现 GdDyHoErTm 高熵合金在三个温区磁熵变的叠加实现了宽温域的 Table-like 磁热效应。这些新奇的物理现象为高效磁制冷材料的开发奠定了坚实基础。

本文结合 DyHoErTm 高熵合金主元元素的物理化学特征和高熵合金固溶体的单相形成判据，研究了 DyHoErTm 合金的相组成和微观形貌。重点分析了该合金的磁相变特征，并从磁熵变( $\Delta S_M$ )和相对制冷功率(RCP)的角度评估该合金的磁热性能。鉴于高熵合金巨大的成分空间，稀土高熵合金的研究旨在为液化氢温区高效磁制冷材料的筛选与设计提供实验依据和理论参考。

## 2. 实验

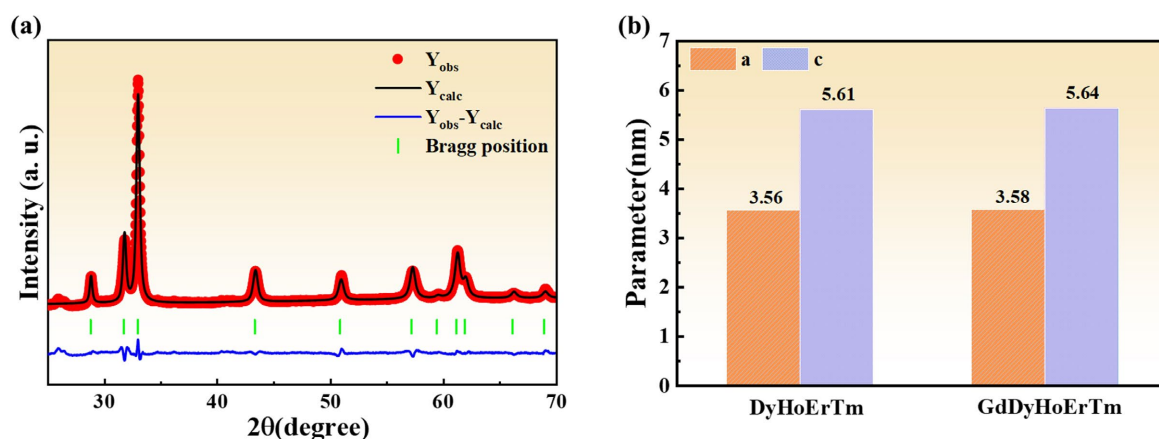
本研究以高纯度(纯度 > 99.99 wt%)的 Dy、Ho、Er 和 Tm 单质为原料，在氩气气氛下采用电弧熔炼

法合成了  $\text{Dy}_{25}\text{Ho}_{25}\text{Er}_{25}\text{Tm}_{25}$ ，后续记作 DyHoErTm，将合金锭反复熔炼 4~5 次以保证均匀性。

对制备获得的磁热合金样品进行各项表征，使用 X 射线衍射仪(X-ray diffraction, XRD, Bruker-AXS D8 Advance)分析晶体结构；使用场发射扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM, QUANTA 250 FEG)进行微观形貌表征，并通过能谱分析仪(Energy Dispersive Spectrometer, EDS)检测样品元素分布情况；使用综合物性测量系统(Physical Property Measurement System, PPMS, Quantum Design-DynaCool)测量样品热磁( $M-T$ )和磁化( $M-H$ )曲线。

### 3. 结果与讨论

如图 1(a)所示，X 射线衍射图谱表明了 DyHoErTm 合金为密排六方结构(HCP，其晶型为 P63/mmc)。除了该合金的衍射峰外，未观察到额外杂相峰或现有峰位的异常消失，这表明该合金为 HCP 单相材料。对 XRD 图谱进行精修，得到 DyHoErTm 合金晶格参数为  $a = b = 3.5625 \text{ \AA}$  和  $c = 5.6137 \text{ \AA}$ 。如图 1(b)所示，DyHoErTm 合金的晶格参数  $a$  和  $c$  均小于已报导的  $\text{Gd}_{20}\text{Dy}_{20}\text{Ho}_{20}\text{Er}_{20}\text{Tm}_{20}$  合金[10] (后续记作 GdDyHoErTm)。这归因于 DyHoErTm 主元元素的原子半径均小于 Gd，如表 1 所示。



**Figure 1.** (a) Rietveld refinement patterns of XRD for DyHoErTm alloy; (b) Lattice parameters  $a$  and  $c$  of DyHoErTm and GdDyHoErTm [10] alloys

**图 1.** (a) DyHoErTm 合金 XRD 精修图谱；(b) DyHoErTm 与 GdDyHoErTm [10]合金的晶格参数  $a$  和  $c$

**Table 1.** Lattice parameters electronegativity, atomic radius, and valence electron concentration (VEC) of each rare earth element; Lattice parameters of DyHoErTm obtained by XRD refinement.

**表 1.** 各稀土元素的晶格参数，电负性，原子半径和价电子浓度；DyHoErTm 合金 XRD 图像精修获得晶格参数

原子	$a$ (Å)	$c$ (Å)	电负性	原子半径(pm)	价电子浓度 VEC
Gd	3.6340	5.7810	1.20	180.20	3
Dy	3.5920	5.6500	1.22	177.30	3
Ho	3.5780	5.6180	1.23	176.60	3
Er	3.5590	5.5850	1.24	175.70	3
Tm	3.5380	5.5540	1.25	174.60	3
DyHoErTm	3.5625	5.6137	-	-	-

高熵合金的形成需通过多类热力学参数综合判断，核心是确保形成稳定单相固溶体，以下是一些关键核心判据[11]：

- 1) 混合熵  $\Delta S_{\text{mix}} \geq 1.5 R$  ( $R$  为气体常数)是“高熵”特性的核心判定标准,可初步筛选高熵合金候选体系。
- 2) 混合焓( $\Delta H_{\text{mix}}$ )宜控制在 $-15\sim 5$  kJ/mol 之间,适中的混合焓有利于抑制金属间化合物析出,稳定单相固溶体。
- 3) 相稳定性参数  $\Omega \geq 1$  时,熵增效应占优,可平衡焓焯作用,可保证单相固溶体在高温下保持稳定。
- 4) 组元原子尺寸差异  $\delta \leq 6.6\%$ , 差异过大会导致晶格畸变严重,不利于单相固溶体形成,影响合金稳定性。
- 5) 电负性差  $\Delta\chi$  需控制在合理范围内,通过元素间化学亲和力减弱原子间化学偏聚倾向,保障固溶体结构均匀性。

**Table 2.** Mixing entropy  $\Delta S_{\text{mix}}$ , mixing enthalpy  $\Delta H_{\text{mix}}$ , melting point  $T_m$ ,  $\Omega$  parameter, atomic radius difference  $\delta$ , and electronegativity difference  $\Delta\chi$  of the DyHoErTm alloy

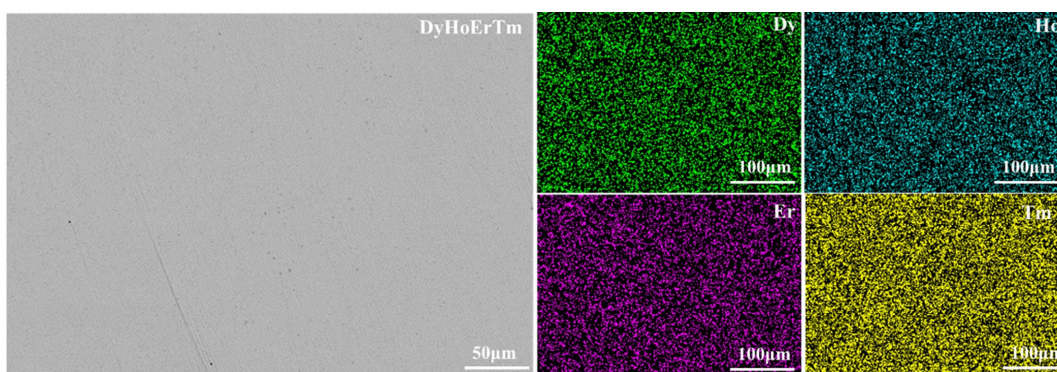
**表 2.** DyHoErTm 合金的混合熵  $\Delta S_{\text{mix}}$ 、混合焓  $\Delta H_{\text{mix}}$ 、熔点  $T_m$ 、 $\Omega$  参数、原子半径差  $\delta$  和电负性差  $\Delta\chi$

Alloy	$\Delta S_{\text{mix}}$ (J/k mol)	$\Delta H_{\text{mix}}$ (kJ/mol)	$T_m$ (K)	$\Omega$	$\delta$ (%)	$\Delta\chi$
DyHoErTm	11.53	0	1490	$\infty$	0.49%	0.0112

根据主元素的晶格参数等物理化学信息,可以计算获得 DyHoErTm 合金的原子半径差  $\delta$ 、混合焓  $\Delta H_{\text{mix}}$  等参数的理论值,如表 2 所示。DyHoErTm 合金的  $\Delta S_{\text{mix}}$  和  $\Delta H_{\text{mix}}$  分别为 11.53 J/k mol 和 0 kJ/mol。

根据等式  $\Omega = \frac{T_m \Delta S_{\text{mix}}}{|\Delta H_{\text{mix}}|}$ ,  $\Omega$  数值为无穷大,意味着高熵合金易形成简单固溶体结构。 $\delta$  为 0.49%,远小于

高熵固溶体的形成判据。电负性数值也表明这些稀土元素不易形成化学偏聚,而是完全随机分布。为了表征样品的微观形貌,采用扫描电子显微镜(SEM)对 DyHoErTm 合金进行了观察。图 2 是合金典型的 SEM 图像,该合金具有单一相的均匀组织,未观察到明显的第二相析出或夹杂物。为进一步验证微观结构的均匀性,利用能谱分析(EDS)对 SEM 图像进行元素面分布分析,主元元素 Dy、Ho、Er 和 Tm 分布均匀,未出现明显的元素偏聚现象。

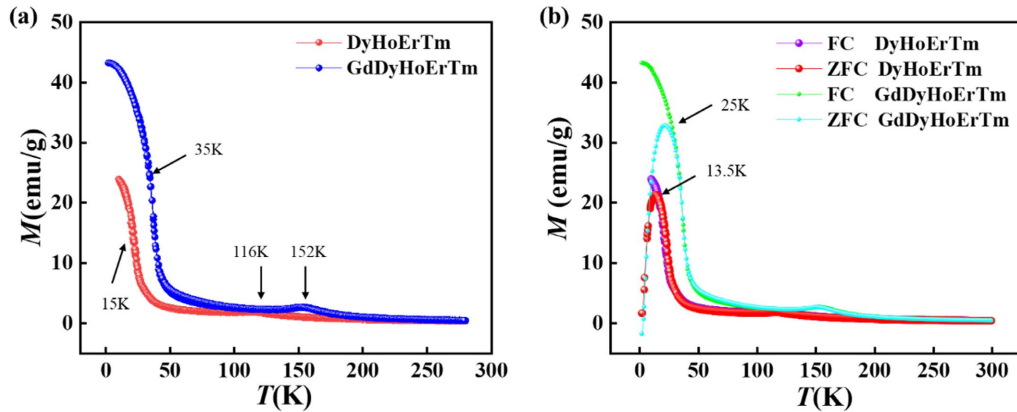


**Figure 2.** SEM image and corresponding elemental mapping images of the DyHoErTm alloy

**图 2.** DyHoErTm 合金扫描电子显微镜图及各元素面分布图

图 3(a)为 DyHoErTm 合金在 0.1 T 外加磁场下的热磁曲线。合金的磁化强度在 15 K 发生剧烈变化,我们认为这里的磁相变类型与组元元素(Dy, Ho, Er 和 Tm)及一些相关高熵合金的磁相变规律一致[9],为铁磁到反铁磁的磁相变。随着温度的增加,磁化强度在 116 K 时存在一个小尖峰,该特征峰对应着合金的奈尔温度( $T_N$ ),表示反铁磁到顺磁相的演变。这个数值与 DyHoErTm 合金各组元元素奈尔温度的平均值(约为 114 K)接近。图 3(b)给出了 DyHoErTm 合金在 0.1 T 外加磁场下的零场冷却(Zero-Field Cooling, ZFC)和场

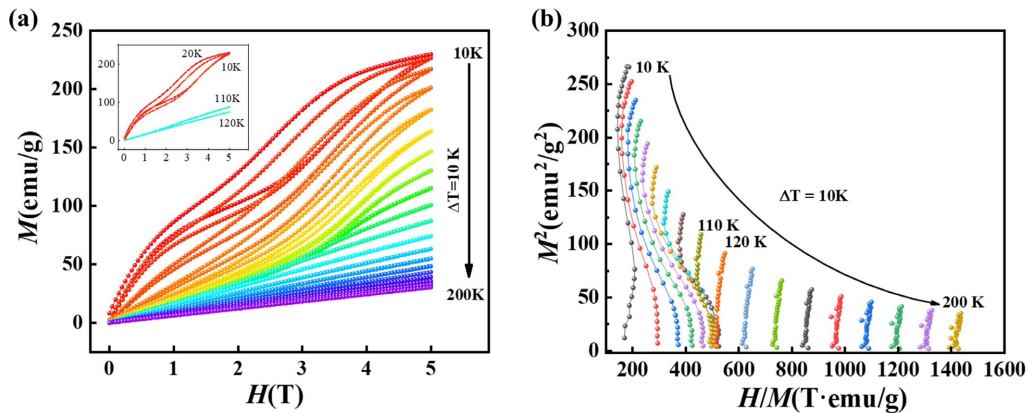
冷却(Field Cooling, FC)热磁曲线。ZFC 曲线在 13.5 K 处出现一个峰值,在此温度以下, ZFC 与 FC 曲线出现明显分离,表明在有外加磁场条件下冷却后,自旋体系的磁态存在差异。我们推测这对应自旋玻璃态在冻结温度( $T_f$ )下发生分裂,而自旋玻璃态是许多稀土元素在低磁场下的常见磁性状态。相较于 GdDyHoErTm [10] 合金, DyHoErTm 合金的两个相变温度均有提升,推测与 Gd 原子相变温度较高的特征有关。



**Figure 3.** (a) Thermomagnetic curves of DyHoErTm and GdDyHoErTm alloy under an applied magnetic field of 0.1 T; (b) ZFC-FC curves of DyHoErTm and GdDyHoErTm [10] alloy measured under an applied magnetic field of 0.1 T

**图 3.** (a) DyHoErTm 和 GdDyHoErTm 合金在 0.1 T 外加磁场下的热磁曲线; (b) DyHoErTm 和 GdDyHoErTm [10]合金在 0.1 T 外加磁场下测试的 ZFC-FC 曲线

为探究 DyHoErTm 合金的磁相变,测试并表征了该合金在 10 到 200 K 温度范围内的磁化曲线,结果如图 4(a)所示。插图展示了在相变温度(15 和 116 K)附近的  $M-H$  曲线。在 10 和 20 K,随着施加初始磁场,磁化强度快速上升,表现出明显的铁磁特性;同时磁化曲线呈现出较大的磁滞后现象,进一步表明铁磁态的存在。而在 110 和 120 K 附近,磁化强度随着磁场的增加线性变化,符合居里外斯定律,磁滞基本消失,展现出顺磁的特性。图 4(b)为 10 到 200 K 温度范围内的 Arrot 曲线,可通过曲线斜率判断磁相变类型。在 30 到 110 K 低温区间, Arrot 曲线呈非线性 S 形,表明材料在外加磁场下发生的反铁磁到铁磁相转变时,存在一级相变。而 110 到 200 K 之间, Arrot 曲线斜率为正,表明合金磁场下从顺磁态到反铁磁的转变是二级相变。

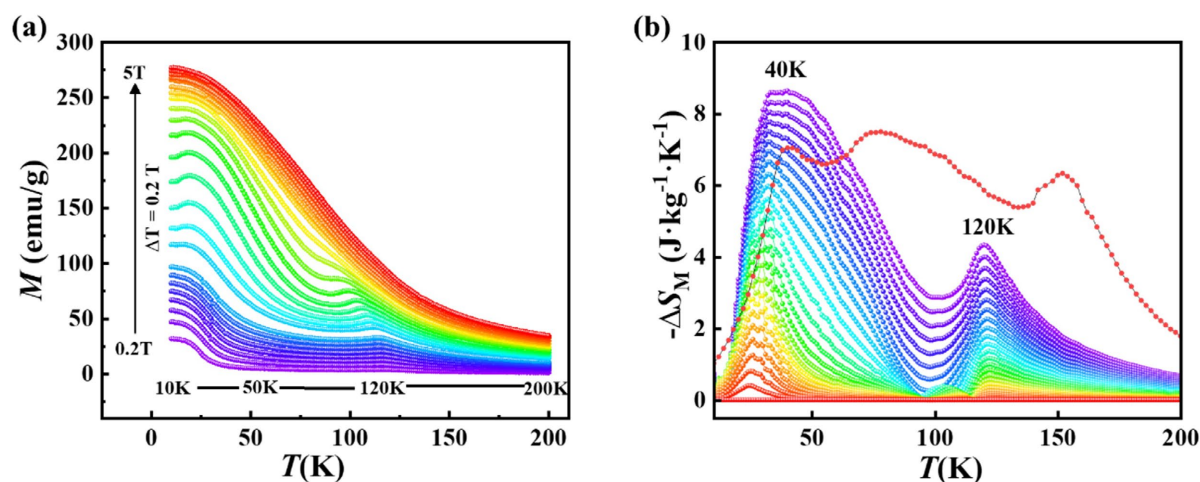


**Figure 4.** (a) Magnetic hysteresis loops of the DyHoErTm alloy measured at 10~200 K, the inset shows the  $M-H$  curves near the phase transition temperatures; (b) Arrott plots of the DyHoErTm alloy measured at 10~200 K

**图 4.** (a) DyHoErTm 合金在 10 K~200 K 处的磁滞回线, 插图为相变温度附近的  $M-H$  曲线; (b) 为 10 K~200 K 处的 Arrot 曲线

进一步研究 DyHoErTm 合金在不同磁场下磁化强度随温度的变化规律, 热磁曲线如图 5(a)所示。随外加磁场的增大, 合金在低温条件 10 K 处的磁化强度逐渐升高。当磁场强度高于 3.6 T 时, 磁化强度在一定温度范围内基本不变, 表明已达到饱和磁化强度。在中温区域随着温度 50 到 120 K 时, 材料从铁磁到反铁磁过渡, 磁化强度急剧下降。弱磁场下, 热磁曲线在较低温度就开始下降, 这一现象证明了弱磁场不足以抑制热扰动导致的磁矩无序化, 因此铁磁性较早的丧失。在这一温度范围下, 磁化强度的拐点表明奈尔温度(即反铁磁到顺磁的转变), 当外加磁场达到 3.6 T 时, 拐点消失, 表明自旋与外加磁场的相互作用胜过了产生磁化差异的自旋相互作用。在高磁场条件下, 磁性转变区域较宽, 曲线下降较平缓, 这是由于外场减缓了磁性退化的过程; 而在低磁场下, 磁性转变区域更陡峭, 由于热扰动的作用, 磁化强度在较窄的温度区间内完全丧失。在 120 K 以上的高温区域, 该材料已完全进入顺磁态, 磁化强度极低。尽管磁场在 0~5 T 范围内升高, 但此时热扰动的影响占据主导, 磁化强度基本不随温度升高而明显变化。

磁热材料的最终性能体现在磁熵变以及相对制冷功率两个关键参数上。图 5(b)为 DyHoErTm 合金根据热磁曲线计算获得的磁熵变曲线。随着磁场从 0 T 增加到 5 T, 该合金的磁熵变大小和温跨逐渐增加, 且主峰出现在低温 40 K 处, 与 GdDyHoErTm 合金主峰的 80 K 相比, 朝低温移动了 40 K。主峰处的磁熵变值为  $8.63 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , 相比于 GdDyHoErTm 合金 80 K 处的磁熵变  $7.5 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  有所提高[10]。120 K 处出现的次要峰, 对应于奈尔温度附近, 说明材料在该温度反铁磁到顺磁的相带来了磁热效应。通过  $RCP = \left| \Delta S_M^{\max} \right| \times \delta T_{\text{FWHM}}$  ( $\delta T_{\text{FWHM}}$  表示半峰宽), 计算得出相对制冷功率为  $841.4 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。此外, 本文汇总了已报道的部分稀土高熵合金(主要为相变温度 150 K 以下)的  $\Delta S_M$  和对应的 RCP, 如表 3 所示[8]-[10][12]-[14]。



**Figure 5.** (a) Thermomagnetic curves of DyHoErTm alloy under applied magnetic fields of 0~5 T; (b) Magnetic entropy change curves of DyHoErTm alloy under magnetic fields of 0~5 T, the outermost red curve represents the magnetic entropy change of GdDyHoErTm [10] alloy under 5 T

**图 5.** (a) DyHoErTm 合金在 0~5 T 外加磁场下的热磁曲线; (b) DyHoErTm 合金在 0~5 T 磁场下的磁熵变曲线, 最外层红色曲线为 GdDyHoErTm [10]合金在 5 T 下的磁熵变曲线

#### 4. 结论

本研究采用电弧熔炼方法制备了 DyHoErTm 稀土高熵合金, 该合金以单相固溶体的形式存在。DyHoErTm 合金铁磁到反铁磁和反铁磁到顺磁的相变温度分别为 15 和 116 K。在 5 T 磁场下, DyHoErTm 合金的最大磁熵变为  $8.63 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , 相对制冷功率为  $841.4 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。该合金在液氢温区附近的磁熵变值得到提升, 但整体制冷温跨和 RCP 有所降低。稀土高熵合金拥有巨大的成分设计空间, 为液氢温区磁制冷

材料的设计与开发提供实验依据和理论参考。

**Table 3.** Maximum magnetic entropy change ( $\Delta S_M$ ), relative cooling power ( $RCP$ ), and peak temperature ( $T_{peak}$ ) of selected rare-earth high-entropy alloys under a magnetic field change of 5 T

**表 3.** 部分稀土高熵合金在 5 T 下最大磁熵变( $\Delta S_M$ )、相对制冷功率( $RCP$ )和峰值温度( $T_{peak}$ )

成分	$\Delta S_M$ ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )	$RCP$ ( $J \cdot kg^{-1}$ )	$T_{peak}$ (K)
TbDyHoEr	6.7	1049.22	150
GdTbHoErLa	5.92	390.72	127
GdTbHoErLaY	5.85	245.7	120
GdTbHoErPr	6.92	498.24	135
GdErHoTb	4.8	627	137
GdTbHoErY	5.4	453	120
GdDyHoErTm	7.5	1100	80

## 基金项目

本研究受到中国博士后科学基金(2022M721617, 2024T171165), 河北省自然科学基金(项目编号 E2025205009)、河北省骨干人才(博士后平台)项目(项目编号 B2025005014), 河北师范大学科研基金(项目编号 L2025K01)的资助。

## 参考文献

- [1] 凌文, 李全生, 张凯. 我国氢能产业发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 80-88.
- [2] Zhang, Y. (2019) Review of the Structural, Magnetic and Magnetocaloric Properties in Ternary Rare Earth RE2T2X Type Intermetallic Compounds. *Journal of Alloys and Compounds*, **787**, 1173-1186. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.02.175>
- [3] Jia, Y., Wang, Q., Qi, Y. and Li, L. (2017) Multiple Magnetic Phase Transitions and Magnetocaloric Effect in Double Perovskites R2NiMnO6 (R = Dy, Ho, and Er). *Journal of Alloys and Compounds*, **726**, 1132-1137. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.08.073>
- [4] Zhang, Y., Hao, W., Shen, J., Mo, Z., Gottschall, T. and Li, L. (2024) Investigation of the Structural and Magnetic Properties of the GdCoC Compound Featuring Excellent Cryogenic Magnetocaloric Performance. *Acta Materialia*, **276**, Article 120128. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2024.120128>
- [5] Zhang, H., Xing, C., Zhou, H., Zheng, X., Miao, X., He, L., et al. (2020) Giant Anisotropic Magnetocaloric Effect by Coherent Orientation of Crystallographic Texture and Rare-Earth Ion Moments in HoNiSi Polycrystal. *Acta Materialia*, **193**, 210-220. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.04.031>
- [6] Zheng, X.Q., Xu, Z.Y., Zhang, B., Hu, F.X. and Shen, B.G. (2017) The Normal and Inverse Magnetocaloric Effect in RCu2 (R=Tb, Dy, Ho, Er) Compounds. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **421**, 448-452. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.08.048>
- [7] Zhang, Y., Xie, Y., Wei, J. and Hao, W. (2024) Experimental and Theoretical Insights into the Structural, Magnetic, and Low-Temperature Magnetocaloric Properties of Re2cotio6 (RE = Gd, Dy, and Er) Double Perovskite Oxides. *Journal of Materials Chemistry A*, **12**, 32396-32407. <https://doi.org/10.1039/d4ta05172f>
- [8] Yuan, Y., Wu, Y., Tong, X., Zhang, H., Wang, H., Liu, X.J., et al. (2017) Rare-Earth High-Entropy Alloys with Giant Magnetocaloric Effect. *Acta Materialia*, **125**, 481-489. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.12.021>
- [9] Zhu, W.H., Ma, L., He, M.F., Li, Z.K., Zhang, H.Z., Yao, Q.R., et al. (2023) Large Refrigerant Capacity Induced by Table-Like Magnetocaloric Effect in High-Entropy Alloys TbDyHoEr. *Advanced Engineering Materials*, **25**, Article 2201770. <https://doi.org/10.1002/adem.202201770>
- [10] 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>
- [11] 李工, 崔鹏, 张丽军, 等. 高熵合金研究现状[J]. 燕山大学学报, 2018, 42(2): 95-104.

- 
- [12] Lu, S.F., Ma, L., Wang, J., Du, Y.S., Li, L., Zhao, J.T., *et al.* (2021) Effect of Configuration Entropy on Magnetocaloric Effect of Rare Earth High-Entropy Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, **874**, Article 159918. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159918>
- [13] Pang, C.M., Chen, L., Xu, H., Guo, W., Lv, Z.W., Huo, J.T., *et al.* (2020) Effect of Dy, Ho, and Er Substitution on the Magnetocaloric Properties of Gd-Co-Al-Y High Entropy Bulk Metallic Glasses. *Journal of Alloys and Compounds*, **827**, 154101. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154101>
- [14] 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>