

Ni₄₄Mn₄₅Sn_{10.5}Al_{0.5}合金的中间马氏体相变研究

余楚豪, 王瑞龙*

湖北大学, 物理学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2023年5月6日; 录用日期: 2023年8月9日; 发布日期: 2023年8月16日

摘要

利用电弧熔炼的方法制备了Al掺杂的Ni₄₄Mn₄₅Sn_{10.5}Al_{0.5}哈斯勒合金样品。磁性测量结果表明, 随温度降低样品表现出奥氏体A至马氏体M₁、马氏体M₁至马氏体M₂的分步磁相变; 随着外加磁场的升高, 奥氏体相的磁矩逐渐增大, 在高磁场下, 依然表现为分步磁相变, 说明该合金样品的中间马氏体相变非常稳定。在50 kOe的外加磁场下, 整个相变过程中产生的最大磁熵变为9.66 J·kg⁻¹·K⁻¹, 表明该合金样品具有一定的磁制冷能力。以上结果对我们深入认识Ni-Mn-Sn合金的磁热效应以及中间马氏体相变的过程提供了良好基础。

关键词

哈斯勒合金, 马氏体相变, 中间马氏体相变, 磁热效应

Intermartensitic Transformation of Ni₄₄Mn₄₅Sn_{10.5}Al_{0.5} Alloy

Chuhao Yu, Ruilong Wang*

School of Physics, Hubei University, Wuhan Hubei

Received: May 6th, 2023; accepted: Aug. 9th, 2023; published: Aug. 16th, 2023

Abstract

The Al-doped Ni₄₄Mn₄₅Sn_{10.5}Al_{0.5} Hassler alloy samples were prepared by arc melting method. The magnetic measurement results show that the samples exhibit a stepwise magnetic transformation from austenite A to martensite M₁, and from martensite M₁ to martensite M₂ with decreasing temperature; With the increase of the magnetic field, the magnetic moment of the austenite phase gradually increases. Under the high magnetic field, it still shows a stepwise magnetic transforma-

*通讯作者。

tion, indicating that the intermartensite transformation of the alloy sample is very stable. Under the magnetic field of 50 kOe, the maximum magnetic entropy generated during the whole phase transformation process is $9.66 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, indicating that the alloy sample has a certain magnetic refrigeration ability. The above results provide a good basis for us to deeply understand the magnetocaloric effect of Ni-Mn-Sn alloy and the process of intermartensite transformation.

Keywords

Heusler Alloys, Martensitic Transformation, Intermartensitic Transformation, Magnetothermal Effect

Copyright © 2023 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

Heusler 合金是一类重要的铁磁形状记忆合金, 其在发生马氏体相变时会伴随多种功能效应, 如磁电阻效应[1], 磁热效应[2], 形状记忆效应[3] [4], 压阻效应[5], 压卡效应[6], 电卡效应[7]以及弹卡效应[8]等。因此, 这些合金在快速运行的驱动器、传感器、信息存储、热磁电转换和磁性制冷剂方面具有巨大的应用潜力[9]。

在不同的元素配比下, 有些合金的马氏体相变会分成两步进行, 即合金在发生从奥氏体结构 A 转变为一种马氏体结构 M_1 的马氏体相变之后, 随着温度继续降低, 还可从这一种马氏体结构 M_1 再转变为另一种马氏体结构 M_2 。像这种由一种马氏体结构 M_1 转变为另一种马氏体结构 M_2 的过程, 称之为中间马氏体相变。中间马氏体相变自从在 Ni-Mn-Ga 合金中被报道出来后[10] [11] [12], Heusler 合金的中间马氏体相变一直是研究热点。随后, Wang 等人[13]在 $\text{Ni}_{52}\text{Mn}_{24.5}\text{Ga}_{23.5}$ 合金中发现的的中间马氏体相变是一个呈现热弹性, 而且该中间马氏体相变提供了比马氏体相变大得多的应变, 在 0.2 T 的小磁场作用下, 便获得了 5.0% 的形状记忆效应。最近, Li 等人[14]在 $\text{Ni}_{55}\text{Mn}_{19}\text{Ga}_{25}\text{Ti}_1$ 多晶合金中观察两步马氏体相变, 同时还发现了其具有大弹热效应, 磁熵变增加到 $29.6 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 在 180 MPa 的应力作用下, 该合金的绝热温度变化为 -12.9 K , 大大优于先前研究的 Ni-Mn-Ga 合金。鉴于 Ni-Mn-Ga 合金比较脆, 难以机械加工, 研究人员相继在无 Ga 的 Heusler 合金中也能观察到分步马氏体相变, 如 NiMnAl 合金[15] [16]和 NiMnInSb 合金[17]等。其中, Ni-Mn-Sn 合金因其组合元素成本低、无毒、脆性小等优点, 在磁性制冷、驱动和自旋电子器件中更受青睐。Dong 等人[18]在 $\text{Ni}_{50-x}\text{Mn}_{36}\text{Sn}_{14}\text{T}_x$ ($T = \text{Pd}, \text{Pt}$)合金中掺杂 Pd(Pt), 诱发了在 $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{36}\text{Sn}_{14}$ 合金的中间马氏体相变, 并发现中间马氏体相变随外加磁场的增加而被逐渐抑制直到消失, 也会随着 Pd(Pt)含量的进一步增加而消失。Zhang 等人[19]发现在 $\text{Ni}_{46.8}\text{Mn}_{38.1}\text{Sn}_{11.6}\text{Fe}_{3.5}$ 马氏体逆相变过程中, 中间马氏体相变有助于合金磁化强度和电阻率的多次突变, 并在 275 K、279 K 和 285 K 的温度下, 观察到三个连续的磁熵变 ΔS_m 峰值, 分别为 $10.7 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 、 $14.5 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 和 $9.7 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 三个磁熵变峰值的出现让工作温度范围增大。

中间马氏体相变的存在扩展了人们对马氏体相变机制的研究范围, 同时也说明马氏体可能存在亚稳态。从应用的角度来看, 两步马氏体相变所伴随的各种物理效应也为哈斯勒合金在某些特定领域的应用提供了一种可能性。为了更进一步研究中间马氏体相变, 我们制备了 $\text{Ni}_{44}\text{Mn}_{45}\text{Sn}_{10.5}\text{Al}_{0.5}$ 合金进行相关研究。

2. 试验方法

本文的实验样品是使用德国 Edmund Bühler 公司生产的 MAM-1 迷你型电弧炉制备。将 Ni (99.98%)、Mn (99.95%)、Sn (99.95%)、Al (99.9%) 等样品原料进行去氧化处理再称取相应质量并放置在坩埚中。另外说明, 由于 Mn 相对其它金属原料沸点低, 在熔炼过程中 Mn 很容易挥发导致进溅和质量损失, 为了减小该情况所导致的实验误差, 我们决定不直接使用 Mn 进行熔炼, 而是选用 Ni-Mn 合金, Ni-Mn 合金的物理性质较为稳定且不宜挥发。该 Ni-Mn 合金由高纯度的 Ni 和 Mn 熔炼而成, 根据实验经验得, Ni 和 Mn 质量约分别控制在 15% 和 85% 时, 实验效果最佳。随后检查熔炼炉气密性并充入氩气开始洗气, 重复 3~5 次。样品需要反复熔化五至六次以确保其均匀性, 然后将熔炼所得的纽扣状样品封入石英管中并真空处理, 在马弗炉中进行热处理, 在 1173 K 保温 24 小时后, 放入冰水中进行淬火。将所制得的样品切割成测试所需的尺寸, 然后使用综合物性测量系统 (PPMS DynaCool) 进行直流磁化强度 M-T 曲线、电阻 R-T 曲线、等温磁化曲线的测量; 利用差示扫描量热仪对合金样品进行了热分析。利用 Maxwell 方程和等温磁化曲线计算并绘制出合金在马氏体相变温度附近的磁熵变曲线。

3. 结果与讨论

3.1. DSC 结果分析

图 1 是 $\text{Ni}_{44}\text{Mn}_{45}\text{Sn}_{10.5}\text{Al}_{0.5}$ 合金样品的 DSC 曲线图。通常, Ni-Mn-X 哈斯勒合金相变时各特征温度按如下规定: 马氏体居里温度 T_C^M , 马氏体相变起始温度 M_s , 马氏体相变结束温度 M_f , 中间马氏体相变温度 T_I , 奥氏体居里温度 T_C^A , 马氏体逆相变起始温度记为 A_s , 马氏体逆相变结束温度 A_f , 中间马氏体逆相变温度 T_I' 。对于 DSC 曲线, 由基线与峰线的交点可以确定各特征温度分别为: $M_s = 251$ K、 $M_f = 228$ K、 $A_s = 241$ K、 $A_f = 263$ K、 $T_I = 240$ K、 $T_I' = 252$ K。我们可以观察到, 升温 and 降温曲线出现了两个明显的峰值 (图中箭头所指), 两峰值出现体现了马氏体相变和中间马氏体相变的过程。以 DSC 降温曲线为例, 当温度下降至 M_s 至 T_I 温度区间, 合金样品开始发生马氏体相变, 从高对称度的 $L2_1$ 型奥氏体相开始逐渐转变为低对称度的中间马氏体相, DSC 曲线出现第一个峰值, 温度继续下降至 T_I 至 M_f 温度区间, 合金样品开始发生中间马氏体相变, 从中间马氏体相开始逐渐转变为马氏体相, DSC 曲线出现第二个峰值, 当温度低于 M_f 时, 合金样品已经由高对称度 $L2_1$ 型奥氏体相基本完全转变成低对称度的马氏体相, 不再出现放热的现象。

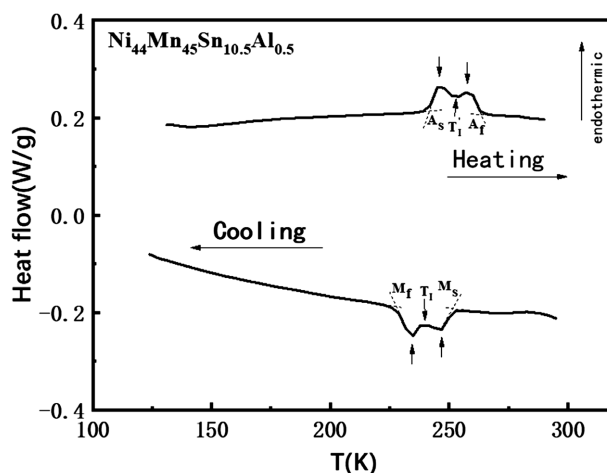


Figure 1. DSC curves for $\text{Ni}_{44}\text{Mn}_{45}\text{Sn}_{10.5}\text{Al}_{0.5}$ alloy

图 1. $\text{Ni}_{44}\text{Mn}_{45}\text{Sn}_{10.5}\text{Al}_{0.5}$ 合金的 DSC 曲线

3.2. 电输运结果分析

为了研究 $\text{Ni}_{44}\text{Mn}_{45}\text{Sn}_{10.5}\text{Al}_{0.5}$ 合金在马氏体相变温度范围内的电输运性质, 我们测量了 $\text{Ni}_{44}\text{Mn}_{45}\text{Sn}_{10.5}\text{Al}_{0.5}$ 合金电阻 R 与温度 T 的关系曲线, 温度区间是 20 K 至 350 K, 如图 2 所示。从 R - T 关系曲线获得的各特征温度与 DSC 曲线所得特征温度基本一致。样品在高温时, 这时为奥氏体相, 表现出的电阻率较小, 低温时为马氏体相, 电阻率较大。合金在 $M_s = 255$ K 时其电阻突然急剧增加, 发生马氏体相变, 由奥氏体逐渐变为中间马氏体, 当温度达到 $T_I = 245$ K 时, 合金发生中间马氏体相变, 由中间马氏体逐渐变为马氏体, 其电阻以不同的斜率继续增加, 然后随着温度进一步降低至 $M_f = 232$ K, 相变过程结束。

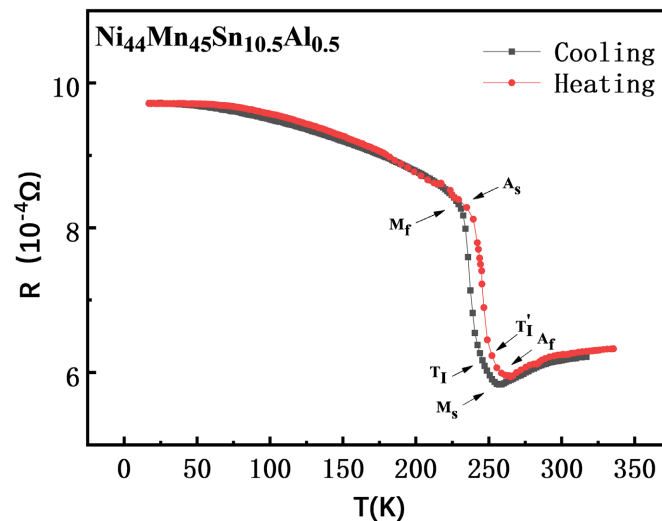


Figure 2. $R(T)$ curves for $\text{Ni}_{44}\text{Mn}_{45}\text{Sn}_{10.5}\text{Al}_{0.5}$ alloy
图 2. $\text{Ni}_{44}\text{Mn}_{45}\text{Sn}_{10.5}\text{Al}_{0.5}$ 合金电阻 R 与温度 T 的关系曲线

3.3. 磁性测量结果分析

为了研究合金的磁性, 我们使用完全无液氦综合物性测量系统 (PPMS DynaCool) 测量了 $\text{Ni}_{44}\text{Mn}_{45}\text{Sn}_{10.5}\text{Al}_{0.5}$ 合金样品在不同磁场下的热磁曲线。在图 3 中, $\text{Ni}_{44}\text{Mn}_{45}\text{Sn}_{10.5}\text{Al}_{0.5}$ 合金相变过程的 M - T 曲线出现的明显的斜率变化, 出现了中间马氏体相变温度 T_I 。 M_s 说明在降温过程中奥氏体相开始转变为中间马氏体相, 奥氏体的占比会随着温度的降低越来越小, T_I 说明在马氏体相变过程中存在中间马氏体相, M_f 说明奥氏体相和中间马氏体相已全部转变为马氏体相, 升温过程也是如此。为了研究中间马氏体对磁场的敏感度, 逐渐增加磁场, 当 $\text{Ni}_{44}\text{Mn}_{45}\text{Sn}_{10.5}\text{Al}_{0.5}$ 合金在外加磁场达到 50 kOe 时, 从 M - T 曲线中依然能在 M_s 至 T_I 温度区间和 T_I 至 M_f 温度区间内发现两种不同斜率的磁化强度变化过程, 即样品在 M_s 至 T_I 温度区间内发生马氏体相变, 在 T_I 至 M_f 温度区间内发生中间马氏体相变, 这说明 $\text{Ni}_{44}\text{Mn}_{45}\text{Sn}_{10.5}\text{Al}_{0.5}$ 合金在高场下依然存在中间马氏体相变, 整体始终表现为分步马氏体相变。

图 4 是 $\text{Ni}_{44}\text{Mn}_{45}\text{Sn}_{10.5}\text{Al}_{0.5}$ 合金的等温磁化曲线, 磁场为 0 至 50 kOe。在 226~230 K 与 254~262 K 时, $\text{Ni}_{44}\text{Mn}_{45}\text{Sn}_{10.5}\text{Al}_{0.5}$ 样品合金的 M - H 曲线的升降场阶段基本重合, 没有出现明显空隙, 这是因为在这两个温度区间缺少外加磁场诱导的相结构改变。而在 234 K 至 250 K 的温度范围内表现出磁场驱动马氏体相变的现象, 在外加磁场和消去磁场的过程中, 磁化曲线的磁滞后现象说明磁场诱导了结构相变, 即由马氏体相、中间马氏体相和奥氏体相的相互转变, 也表明马氏体相变为一阶磁相变的过程。

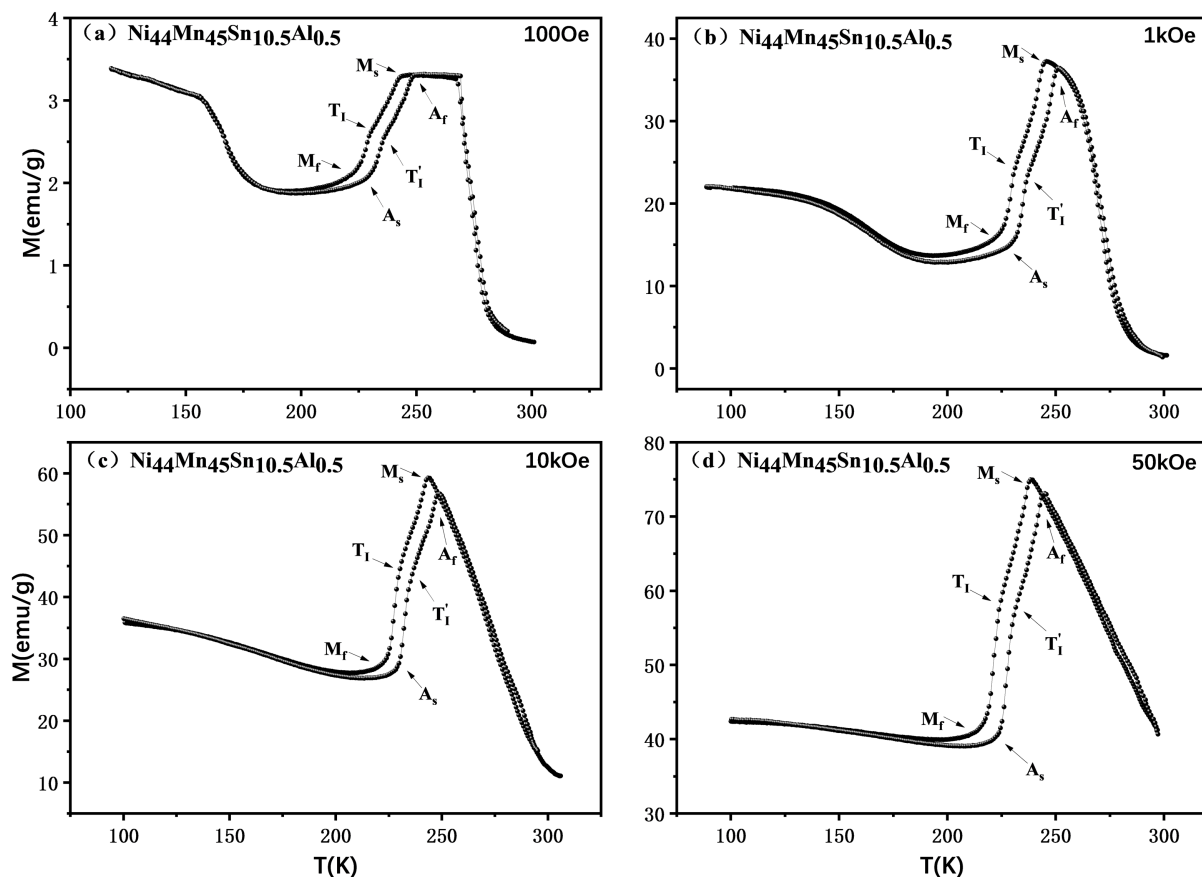


Figure 3. $M(T)$ curves for $\text{Ni}_{44}\text{Mn}_{45}\text{Sn}_{10.5}\text{Al}_{0.5}$ alloy at: (a) 100 Oe; (b) 1 kOe; (c) 10 kOe and (d) 50 kOe

图 3. $\text{Ni}_{44}\text{Mn}_{45}\text{Sn}_{10.5}\text{Al}_{0.5}$ 合金的 $M-T$ 曲线: (a) 100 Oe; (b) 1 kOe; (c) 10 kOe; (d) 50 kOe

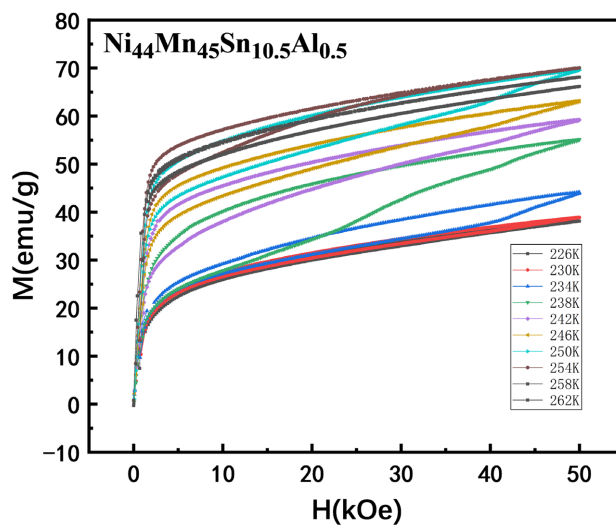


Figure 4. Isothermal magnetization $M(H)$ curves for $\text{Ni}_{44}\text{Mn}_{45}\text{Sn}_{10.5}\text{Al}_{0.5}$ alloy

图 4. $\text{Ni}_{44}\text{Mn}_{45}\text{Sn}_{10.5}\text{Al}_{0.5}$ 合金的等温磁化曲线

3.4. 磁热效应分析

由 Maxwell 关系计和 $\text{Ni}_{44}\text{Mn}_{45}\text{Sn}_{10.5}\text{Al}_{0.5}$ 合金的等温磁化曲线(图 4)可以计算出 $\text{Ni}_{44}\text{Mn}_{45}\text{Sn}_{10.5}\text{Al}_{0.5}$ 合金

在相变温度附近的 ΔS_m 估算值, 并绘制 $\text{Ni}_{44}\text{Mn}_{45}\text{Sn}_{10.5}\text{Al}_{0.5}$ 合金样品相变温度附近磁熵变 ΔS_m -T 曲线(图 5)。Maxwell 关系式如下:

$$\Delta S_m = \int_0^H \left(\frac{\partial M(H, T)}{\partial T} \right)_H dH$$

由图 5 可以得知, 在 10 kOe 的外加磁场下, $\text{Ni}_{44}\text{Mn}_{45}\text{Sn}_{10.5}\text{Al}_{0.5}$ 的 ΔS_m 达到最大值 $2.10 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 在 50 kOe 的外加磁场下, $\text{Ni}_{44}\text{Mn}_{45}\text{Sn}_{10.5}\text{Al}_{0.5}$ 的 ΔS_m 达到最大值 $9.66 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。另外, 在主峰旁还能观察到一个次峰, 两个磁熵变峰值的出现说明了马氏体相变和中间马氏体相变过程的存在, 同时还拓宽了材料的可用温度区间。

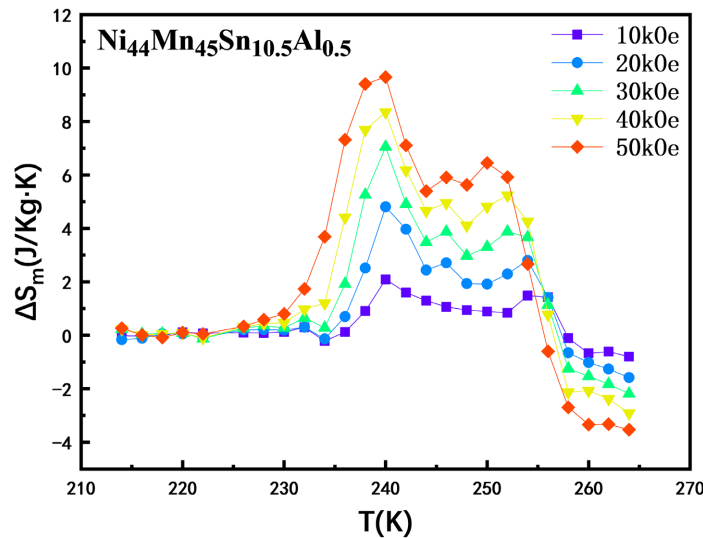


Figure 5. ΔS_m curves for $\text{Ni}_{44}\text{Mn}_{45}\text{Sn}_{10.5}\text{Al}_{0.5}$ alloy
图 5. $\text{Ni}_{44}\text{Mn}_{45}\text{Sn}_{10.5}\text{Al}_{0.5}$ 合金的磁熵变曲线

4. 结论

本文研究了 $\text{Ni}_{44}\text{Mn}_{45}\text{Sn}_{10.5}\text{Al}_{0.5}$ 合金中间马氏体相变过程。在 DSC 曲线中观察到两个吸放热峰, 通过对其电阻测量和磁性测量, 发现在合金相变过程中 R-T 曲线和 M-T 曲线均呈现两步斜率变化, 进一步证实了该合金的马氏体相变分两步进行, 即存在中间马氏体相变。另外, 随着外加磁场的增加, 即使外加磁场达到 50 kOe, $\text{Ni}_{44}\text{Mn}_{45}\text{Sn}_{10.5}\text{Al}_{0.5}$ 依然表现出中间马氏体相变, 说明其中间马氏体相变非常稳定; 磁熵变曲线具有两个连续的、正值磁熵变峰值, 说明中间马氏体相变的存在拓宽了材料的可用温度区间。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(11674115 和 11674086)。

参考文献

- [1] Swathi, S., Arun, K., Remya, U.D., *et al.* (2023) $\text{Ni}_{48}\text{Ag}_2\text{Mn}_{37}\text{In}_{13}$ Multifunctional Alloy: A Room Temperature Inverse Magnetocaloric and Magnetoresistive Material. *Journal of Alloys and Compounds*, **938**, Article ID: 168590. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.168590>
- [2] Yang, J., Li, Z., Zhang, X., *et al.* (2023) Manipulation of Thermal Hysteresis and Magnetocaloric Effect in the Ni-Co-Mn-In Alloys through Lattice Contraction: Effect of Ge Substitution for In. *Acta Materialia*, **246**, Article ID: 118694. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2023.118694>

- [3] Zheng, S., Li, C., Guo, L., *et al.* (2023) Reverse Shape Memory Effect in Cu-Mn-Ga-Mo Alloys. *Materials Characterization*, **197**, Article ID: 112679. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2023.112679>
- [4] Mohan, M., Krishna, T.S.V., Rao, D.V.N.J. and Rao, D.S. (2023) Influence of Silver Addition on Wear Characteristics of Cu-Al-Mn Shape Memory Alloys. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.021>
- [5] Zhang, Y., Li, Z., Kang, Y., *et al.* (2021) Relative Contributions of the Electron-Lattice and the Electron-Spin Scatterings to the Giant Baroresistance Effect in Ni-Co-Mn-In System. *Journal of Alloys and Compounds*, **859**, Article ID: 157827. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157827>
- [6] Sharma, V.K. and Manekar, M. (2023) Estimation of Barocaloric Effect Across the Magnetostructural Transition in Mn-Co-Ge Alloy from Magnetization Measurements under Pressure. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **565**, Article ID: 170236. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.170236>
- [7] Vidyasagar, R., Hannel, M., Varga, M., *et al.* (2023) Structural, Thermo-Electric, and Thermo-Magnetic Characteristics of Non-Stoichiometric L2₁-Type Fe₄₃Mn₂₉Si₂₈ Heusler Structures. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, **174**, Article ID: 111185. <https://doi.org/10.1016/j.jpccs.2022.111185>
- [8] Guan, Z., Bai, J., Zhang, Y., *et al.* (2023) Ultrahigh Cyclic Stability and Giant Elastocaloric Effect in Directionally Solidified (Ni₅₀Mn₂₈Fe_{2.5}Ti_{19.5})_{99.4}B_{0.6} Alloy. *Scripta Materialia*, **229**, Article ID: 115353. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2023.115353>
- [9] Pecharsky, V.K. and Gschneidner Jr., K.A. (2006) Advanced Magnetocaloric Materials: What Does the Future Hold? *International Journal of Refrigeration*, **29**, 1239-1249. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2006.03.020>
- [10] Kokorin, V.V., Chernenko, V.A., Cesari, E., *et al.* (1996) Pre-Martensitic State in Ni-Mn-Ga Alloys. *Journal of Physics Condensed Matter*, **8**, 6457-6463. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/8/35/014>
- [11] Vasil'Ev, A.N., Keiper, A.R., Kokorin, V.V., *et al.* (1993) The Structural Phase Transitions in Ni₂MnGa Induced by Low-Temperature Uniaxial Stress. *International Journal of Applied Electromagnetics in Materials*, **5**, 163-169.
- [12] Martynov, V.V. and Kokorin, V.V. (1992) The Crystal Structure of Thermally- and Stress-Induced Martensites in Ni₂MnGa Single Crystals. *Archives of Mechanics*, **2**, 739-749. <https://doi.org/10.1051/jp3:1992155>
- [13] Wang, W.H., Wu, G.H., Chen, J.L., *et al.* (2001) Intermartensitic Transformation and Magnetic-Field-Induced Strain in Ni₅₂Mn_{24.5}Ga_{23.5} Single Crystals. *Applied Physics Letters*, **79**, 1148-1150. <https://doi.org/10.1063/1.1396820>
- [14] Li, D., Zhang, X., Zhang, G., *et al.* (2021) Enhancing the Elastocaloric Effect in Ni-Mn-Ga Alloys through the Coupling of Magnetic Transition and Two-Step Structural Transformation. *Applied Physics Letters*, **118**, Article ID: 213903. <https://doi.org/10.1063/5.0048588>
- [15] Inoue, T., Morito, S., Murakami, Y., Oda, K. and Otsuka, K. (1994) New Martensite Structures and Composition Dependence of Martensitic Transformations in Ni₅₀Al_xMn_{50-x} Alloys. *Materials Letters*, **19**, 33-37. [https://doi.org/10.1016/0167-577X\(94\)90101-5](https://doi.org/10.1016/0167-577X(94)90101-5)
- [16] Morito, S. and Otsuka, K. (1996) Electron Microscopy of New Martensites with Long Period Stacking Order Structures in Ni₅₀Al_xMn_{50-x} Alloys I. Structures and Morphologies. *Materials Science & Engineering A*, **208**, 47-55. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(95\)10051-2](https://doi.org/10.1016/0921-5093(95)10051-2)
- [17] Yu, S.Y., Yan, S.S., Zhao, L., *et al.* (2010) Intermartensitic Transformation and Magnetic Field Effect in NiMnInSb Ferromagnetic Shape Memory Alloys. *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, **322**, 2541-2544. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2010.03.017>
- [18] Dong, S.Y., Chen, J.Y., Han, Z.D., *et al.* (2016) Intermartensitic Transformation and Enhanced Exchange Bias in Pd (Pt)-Doped Ni-Mn-Sn Alloys. *Scientific Reports*, **6**, Article No. 25911. <https://doi.org/10.1038/srep25911>
- [19] Zhang, H., Zhang, X., Xiao, Y., *et al.* (2022) Peculiarity of Magnetocaloric and Magnetoresistance Effects in Ni-Mn-Sn-Fe Alloy with Successive Metamagnetic Structural Transitions. *Intermetallics*, **149**, Article ID: 107651. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2022.107651>