

Fe₂₅Co₂₅Ni₂₅Cr₅P₁₀B₁₀高熵块体非晶态合金磁热效应的研究*吴克楠¹, 刘丛¹, 李强¹, 霍军涛², 孙言飞¹

(1. 新疆大学物理科学与技术学院, 乌鲁木齐 830046;

2. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 浙江 宁波 315201)

摘要: 利用 Fluxing 提纯处理和 J-Quenching 技术相结合的方法成功制备了最大尺寸为 1.2 mm 的 Fe₂₅Co₂₅Ni₂₅Cr₅P₁₀B₁₀ 高熵块体非晶态合金, 并对它的磁热性能进行的表征和研究, 以探讨高熵效应对非晶态合金磁热性能的影响。目前的高熵块体非晶态合金的居里温度为 572 K。在外加磁场为 1.5 和 5 T 时, 它的最大等温磁熵变和制冷能力的值分别为 0.66 J/(kg·K), 42.9 J/kg 和 1.88 J/kg, 136.1 J/(kg·K)。与其它非晶态合金磁热性能的对比显示, 高熵效应对非晶态合金磁熵变似乎并没有明显影响, 但高熵非晶态合金磁熵变随温度变化曲线显示了较大的半高宽温度区间。

关键词: 高熵块体非晶态合金; 磁热性能; 高熵效应

中图分类号: TB333

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-9731.2019.05.015

0 引言

高熵合金是一种新型的合金, 是指由 5 种或者 5 种以上主要元素, 根据等原子比或接近等原子比, 且每个组元成分差异在 5%~35% 之间, 使其合金化形成固溶体相的合金^[1]。高熵合金由于主要元素增多而使合金具有高熵效应, 且组元之间具有很好的相容性^[2]。高熵非晶态合金, 不但具有高熵合金的高热阻、高电阻等优点, 而且还具有非晶态合金抗氧化和耐腐蚀性、良好的磁学性能等优点^[3], 是目前材料研究领域的一个热点, 具有很大的研究价值。

与普通块体非晶态合金和高熵合金相比, 高熵块体非晶态合金由于其独特拓扑学和化学混乱结构, 表现出很多优异的性能。Zn₂₀Ca₂₀Sr₂₀Yb₂₀(Li_{0.55}Mg_{0.45})₂₀^[4] 和 SrCaYbLiMgZn^[5] 高熵块体非晶态合金表现出超低的玻璃转变温度和在室温具有显著的均匀性塑性变形; 与 CaMgZn 块体非晶态合金相比, Ca₂₀Mg₂₀Zn₂₀Sr₂₀Yb₂₀ 高熵块体非晶态合金具有更加优异的机械性能和耐腐蚀性, 更适合应用于生物医药^[6]。然而到目前为止, 对高熵块体非晶态合金的磁性能, 尤其是磁热性能, 研究比较少。磁制冷技术基于磁制冷工质材料的磁热效应。而磁热效应与材料的磁熵、晶格熵等密切相关。因此, 高熵效应是否对合金的磁热性能有显著的影响, 或产生明显的促进作用, 这将是一个有趣且有意义的研究课题。在本文中, 研究了 Fe₂₅Co₂₅Ni₂₅Cr₅P₁₀B₁₀ 高熵块体非晶态合金的磁热效应, 探索高组态熵(高熵效应)和非晶态结构对高熵块体非晶态合金

磁热性能的影响。

1 实验

首先根据设定的合金成分, 用精密电子天平按比例称量出纯度质量分数为 99.9% 的 Co 粉, 99.9% 的 Fe 粉, 99.7% Ni 粉, 99.5% 的 Fe₃P 粉, 99.9% B 粒和 99.7% 的 Cr 粉。在氩气的环境下, 用火枪对称量好的药品进行合金化, 得到母合金锭。接下来对母合金进行 Fluxing 提纯处理 4 h 左右, 最后利用 J-Quenching 技术^[7] 制备出直径为 1~2 mm, 长度为 5~8 cm 的合金棒。制备的样品用 X 射线衍射仪(XRD, Bruker D8 Advance) 来检测是否为完全的非晶态结构。使用差示扫描量热计(DSC, NETZSCH DSC 404 F1), 在高纯氩气的保护气氛下对样品进行热力学扫描, 测定其热力学性能。样品的磁热性能用超导量子磁强计(SQUID, MPMS XL-7) 测量。用于磁热性能测试的样品按下面的方法准备: 首先从直径为 1 mm 的块体非晶态棒沿端面切下厚度约为 1 mm 的圆片, 将圆片用 AB 胶粘于载玻片上用 2 000 号水砂纸分别打磨两个表面, 最后得到直径为 1 mm、厚度约为 0.5 mm 的圆片, 用于磁热性能测试。测试时, 外加场方向平行于圆片样品的表面。

2 结果与讨论

2.1 Fe₂₅Co₂₅Ni₂₅Cr₅P₁₀B₁₀ 块体非晶态合金的制备和热稳定性

图 1 显示了所制备的直径为 1.2 mm 的 Fe₂₅Co₂₅-

* 基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目(2016D01C025)

收到初稿日期: 2018-11-12

收到修改稿日期: 2019-03-19

通讯作者: 李强, E-mail: qli@xju.edu.cn

作者简介: 吴克楠(1993-), 男, 乌鲁木齐人, 在读硕士, 师承李强教授, 从事块体非晶态合金材料研究。

$\text{Ni}_{25}\text{Cr}_5\text{P}_{10}\text{B}_{10}$ 高熵合金棒的 XRD 图谱以及扫描速率为 0.33 K/s 下的 DSC 扫描曲线。样品的 XRD 图谱显示出非晶态结构所具有的典型的漫散峰,没有尖锐的晶化峰出现,表明制备的样品是完全的非晶态结构。DSC 曲线显示,随着温度的升高,样品首先出现明显的玻璃转变,紧接着是一个单个的晶化峰。由 DSC 曲线上可以确定出样品的玻璃转变温度(T_g)为 686 K ,起始晶化温度(T_x)为 721 K ,过冷液相区($\Delta T_x = T_x - T_g$)为 35 K 。 $\text{Fe}_{25}\text{Co}_{25}\text{Ni}_{25}\text{Cr}_5\text{P}_{10}\text{B}_{10}$ 高熵非晶总的结晶放热焓为 120.5 J/g 。DSC 热力学扫描的结果进一步验证了所制备的样品为完全的非晶态结构。传统的过渡族金属(铁、钴等)基非晶态合金的过冷液相区宽度一般小于 30 K [7-9],相对而言,目前的 $\text{Fe}_{25}\text{Co}_{25}\text{Ni}_{25}\text{Cr}_5\text{P}_{10}\text{B}_{10}$ 高熵非晶态合金具有较大的过冷液相区宽度。这可能是由于高的组态熵稳定了液相,从而导致了目前高熵非晶态合金具有较大的过冷液相区。还可以看到,目前的 $\text{Fe}_{25}\text{Co}_{25}\text{Ni}_{25}\text{Cr}_5\text{P}_{10}\text{B}_{10}$ 高熵块体非晶态合金的临界尺寸为 1.2 mm ,与大部分传统的过渡族金属基块体非晶态合金的临界尺寸相当,甚至略小。这表明,尽管高的组态熵增强了目前高熵非晶合金的液相稳定性,但对合金的玻璃化形成能力却没有提高。

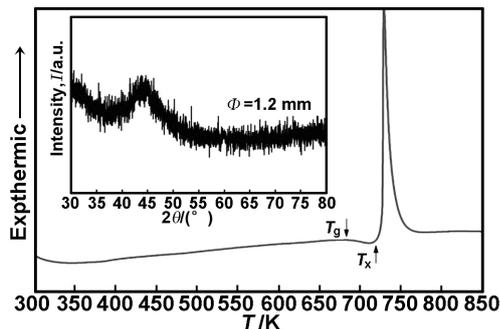


图 1 $\text{Fe}_{25}\text{Co}_{25}\text{Ni}_{25}\text{Cr}_5\text{P}_{10}\text{B}_{10}$ 高熵块体非晶态合金的 XRD 图谱(插图)和扫描速率为 0.33 K/s 下的 DSC 扫描曲线

Fig 1 XRD and DSC curves of the as-prepared $\text{Fe}_{25}\text{Co}_{25}\text{Ni}_{25}\text{Cr}_5\text{P}_{10}\text{B}_{10}$ HE-BMG

2.2 $\text{Fe}_{25}\text{Co}_{25}\text{Ni}_{25}\text{Cr}_5\text{P}_{10}\text{B}_{10}$ 高熵块体非晶态合金的磁热性能

图 2 为 $\text{Fe}_{25}\text{Co}_{25}\text{Ni}_{25}\text{Cr}_5\text{P}_{10}\text{B}_{10}$ 高熵块体非晶态合金在外加磁场为 0.02 T 下的 $M-T$ 曲线。从图 2 可以看出,样品的磁化强度随着温度的升高而降低,在居里温度附近,非晶态合金的磁化强度变化最为剧烈,表明样品从铁磁相转变为顺磁相。通过对 $M-T$ 曲线求导,得到 $dM/dT-T$ 曲线(见图 2 插图),可确定样品的居里温度 T_c 为 572 K 。

图 3(a)和(b)分别显示了 $\text{Fe}_{25}\text{Co}_{25}\text{Ni}_{25}\text{Cr}_5\text{P}_{10}\text{B}_{10}$ 高熵块体非晶非晶态合金的等温磁化曲线以及 Arrot 曲线。在居里温度附近,测试的温度间隔是 $3\sim 5\text{ K}$,远离居里温度的测量温度间隔是 10 K 。由图 3(a)可以看到,当温度低于居里温度时,材料在低磁场时就很

快达到饱和,说明此时样品处于铁磁态;而当温度高于居里温度时,材料的磁化强度随着外加磁场的增加呈线性变化,没有达到饱和,表现出顺磁性。

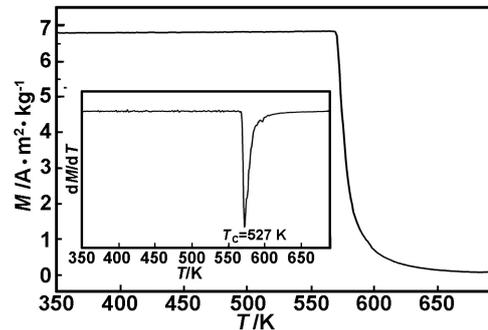


图 2 $\text{Fe}_{25}\text{Co}_{25}\text{Ni}_{25}\text{Cr}_5\text{P}_{10}\text{B}_{10}$ 高熵块体非晶态合金在外加磁场为 0.02 T 时的 $M-T$ 曲线以及 $dM/dT-T$ 曲线(插图)

Fig 2 Temperature dependence of the magnetization and dM/dT versus temperature curves for $\text{Fe}_{25}\text{Co}_{25}\text{Ni}_{25}\text{Cr}_5\text{P}_{10}\text{B}_{10}$ HE-BMG under 0.02 T

在居里温度附近,其磁化强度并未发生突变,说明是二级相变。Arrot 曲线可以更清楚地显示样品的磁性转变方式。由图 3(b)可以看到,曲线在 $545\sim 650\text{ K}$ 的温度范围内的斜率是正值,没有出现负值或者拐点,说明样品在这个温度范围内发生的相变是二级相变。

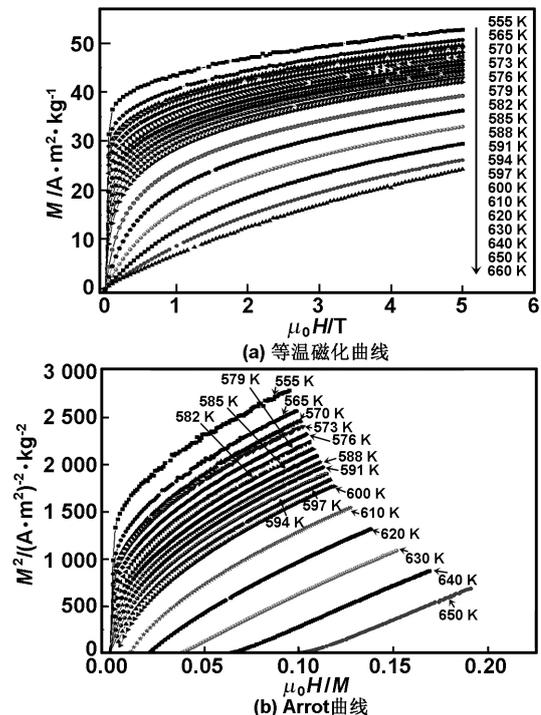


图 3 $\text{Fe}_{25}\text{Co}_{25}\text{Ni}_{25}\text{Cr}_5\text{P}_{10}\text{B}_{10}$ 高熵块体非晶非晶态合金的等温磁化曲线和 Arrot 曲线

Fig 3 Isothermal magnetization curves and Arrot curves of $\text{Fe}_{25}\text{Co}_{25}\text{Ni}_{25}\text{Cr}_5\text{P}_{10}\text{B}_{10}$ HE-BMG measured in the temperature range from 430 to 650 K

图 4(a) 显示的是在外加磁场为 1.5~5 T 时 Fe₂₅Co₂₅Ni₂₅Cr₅P₁₀B₁₀ 高熵块体非晶态合金的 ΔS_M-T 曲线。由图 4(a) 可以确定, 在外加磁场为 1.5 和 5 T 时, 它的最大等温磁熵变 ($|\Delta S_M^{peak}|$) 和制冷能力

(RC_{FWHM}) 的值分别为 0.66 J/(kg·K), 42.9 J/kg 和 1.88 J/(kg·K), 136.1 J/kg。由图 4(b) 可以看到, 可以确定对于外加磁场为 5 T 下的 ΔS_M-T 曲线其半高宽对应的温度区间约为 110 K。

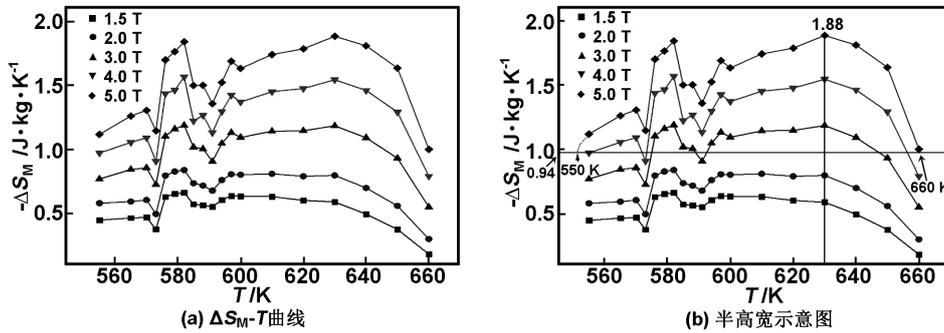


图 4 Fe₂₅Co₂₅Ni₂₅Cr₅P₁₀B₁₀ 高熵块体非晶态合金在外加磁场为 1.5~5 T 下的 ΔS_M-T 曲线和半高宽示意图
Fig 4 Magnetic entropy changes as a function of temperature under the applied magnetic field of 1.5-5 T for the present Fe₂₅Co₂₅Ni₂₅Cr₅P₁₀B₁₀ HE-BMG and diagrammatic drawing of ΔT_{FWHM} of Fe₂₅Co₂₅Ni₂₅Cr₅P₁₀B₁₀ HE-BMG

目前的 Fe₂₅Co₂₅Ni₂₅Cr₅P₁₀B₁₀ 高熵块体非晶态合金和一些挑选的 Fe 基、Co 基以及高熵非晶态合金在不同磁场下的磁热性能参数 (包括 $|\Delta S_M^{peak}|$ 、 RC_{FWHM} 和 ΔS_M-T 曲线半高宽温度区间 ΔT_{FWHM}) 被列入表 1 中。从表 1 可以明显看出, 目前的高熵块体非晶态合金的表 1 目前的高熵块体非晶态合金和一些挑选的 Fe 基、Co 基以及高熵非晶态合金在外加磁场为 1.5, 2, 5 T 下的磁热性能 (C 表示晶态)

磁热性能并不突出, 其最大磁熵变值高于 Co 基非晶态合金, 但低于 Fe 基非晶态合金。知道合金的最大磁熵变值正比于其饱和磁化强度^[10]。图 5 显示了几种过渡族金属基非晶态合金的饱和磁化强度与 1.5 T 磁场下最大磁熵变值的关系图。

Table 1 Magnetocaloric properties of the present Fe₂₅Co₂₅Ni₂₅Cr₅P₁₀B₁₀ HE-BMG, some selected Fe, Co-based BMGs and some other HE-BMG at 1.5, 2 and 5 T applied magnetic field (C represents crystalline)

Composition/at%	T_C/K	$ \Delta S_M^{peak} /J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$			$RC_{FWHM}/J \cdot kg^{-1}$			$\Delta T_{FWHM}/J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	Ref.
		1.5 T	2 T	5 T	1.5 T	2 T	5 T	5 T	
Fe ₂₅ Co ₂₅ Ni ₂₅ Cr ₅ P ₁₀ B ₁₀	572	0.66	0.84	1.88	42.9	57.1	136.1	约 110	present
Ni ₃₂ Gd ₁₆ Al ₂₂	62			10.2			762		[12]
Fe ₈₀ P ₁₃ C ₇	579	2.20	2.7	5.05	125.6	170.1	479.8	95	[8]
Fe ₇₉ Gd ₁ B ₁₂ Cr ₈	355	1.42	3.59		153		627		[13]
Fe ₇₇ Ta ₅ B ₁₀ Zr ₉ Cu ₁	313		1.04	2.03		92.2	241.5		[14]
Fe ₆₆ Mn ₁₄ P ₁₀ B ₇ C ₃	319	0.91	1.12		99.84	134.3			[15]
Co ₇₁ Mo ₉ P ₁₄ B ₆	317	0.37	0.47	0.96	33.0	41.3	70.5	72.9	[7]
Co ₆₂ Nb ₆ Zr ₂ B ₃₀	210	0.36							[16]
Gd ₃₅ Ni ₁₅ Al ₃₀	70			6.12			606	99	[17]
Gd ₂₀ Tb ₂₀ Dy ₂₀ Co ₂₀ Al ₂₀	58			9.43			632	67	[11]
MnFeP _{0.45} As _{0.55} (C)	305		14.5	18			152.3		[18]
Gd ₅ Si ₂ Ge ₂ (C)	275		14	18.5			109.2		[19]

从图 5 可以看到, 这几种非晶态合金的饱和磁化强度与最大磁熵变值呈现出非常好的线性关系, 目前的 Fe₂₅Co₂₅Ni₂₅Cr₅P₁₀B₁₀ 高熵非晶态合金也非常符合这一线性关系。这似乎表明高熵效应对非晶态合金的最大磁熵变值没有贡献。然而由表 1 可以发现, 与其它 Fe 基、Co 基非晶态合金相比, 目前的高熵块体非晶态合金具有较大的半高宽温区 ΔT_{FWHM} 。这一结果在 Gd-Tb-Dy-Al-M(M=Fe, Co, Ni) 高熵非晶态合金中也被发现^[11]。作者将这一结果归因于非晶的自旋玻璃行为以及高熵非晶合金复杂的成分。在自旋玻璃相

中, 电子磁矩被无序的冻结在平衡方向, 致使其相对铁磁材料更难被冻结, 从而使其磁性转变温度区间变宽, 导致材料的半高宽温区 ΔT_{FWHM} 变宽。

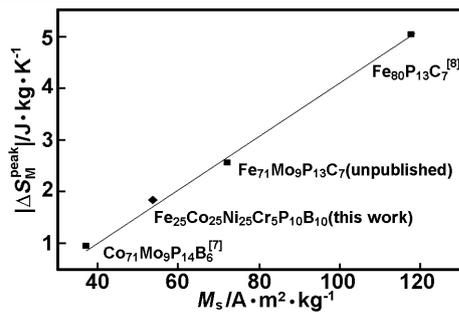


图5 几种过渡族金属基非晶态合金的饱和磁化强度 (M_s) 与 1.5 T 磁场下最大磁熵变值 ($|\Delta S_M^{\text{peak}}|$) 的关系图

Fig 5 Plot of saturation magnetization (M_s) against the peak value of magnetic entropy change ($|\Delta S_M^{\text{peak}}|$) of the present $\text{Fe}_{25}\text{Co}_{25}\text{Ni}_{25}\text{Mo}_5\text{P}_{10}\text{B}_{10}$ HE-BMG and several selected transition metal-based BMGs under the applied magnetic field of 1.5 T

3 结 论

通过采用 Fluxing 提纯处理和 J-Quenching 技术相结合的方法我们成功制备出最大直径达 1.2 mm 的 $\text{Fe}_{25}\text{Co}_{25}\text{Ni}_{25}\text{Cr}_5\text{P}_{10}\text{B}_{10}$ 高熵块体非晶态合金。测试结果显示,高熵块体非晶态合金的居里温度为 572 K。在外加磁场为 1.5 和 5 T 下,高熵块体非晶态合金的最大等温磁熵变和制冷能力的值分别为 0.66 J/(kg·K), 42.9 J/kg 和 1.88 J/(kg·K), 136.1 J/kg。高熵块体非晶态合金的 ΔS_M-T 曲线显示了较宽的半高宽温度区间,在 5 T 的外场下其半高宽温区约为 110 K,明显大于其它 Fe、Co 基非晶态合金。目前的结果表明,高熵效应似乎对非晶态合金等温磁熵变的值影响不大,但明显拓宽了合金 ΔS_M-T 曲线的半高宽温区宽度,从而导致较大的制冷能力。

参考文献:

- [1] Cantor B, Chang I T H, Knight P, et al. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys[J]. Materials Science and Engineering; A, 2004, 375-377(1): 213-218.
- [2] Guo S, Liu C T. Phase stability in high entropy alloys: formation of solid-solution phase or amorphous phase[J]. Progress in Natural Science; Materials International, 2011, 21(6): 433-446.
- [3] Zhang Y, Zuo T T, Tang Z, et al. Microstructures and properties of high-entropy alloys[J]. Progress in Materials Science, 2014, 61: 1-93.
- [4] Zhao K, Xia X X, Bai H Y, et al. Room temperature homogeneous flow in a bulk metallic glass with low glass transition temperature[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(14):4067.
- [5] Gao X Q, Zhao K, Ke H B, et al. High mixing entropy

- bulk metallic glasses[J]. Journal of Non-crystalline Solids, 2011, 357(21): 3557-3560.
- [6] Li H F, Xie X H, Zhao K, et al. In vitro and in vivo studies on biodegradable CaMgZnSrYb high-entropy bulk metallic glass[J]. Acta Biomaterialia, 2013, 9(10): 8561-8573.
- [7] Liu C, Li Q, Huo J, et al. Near room-temperature magnetocaloric effect of Co-based bulk metallic glass[J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 2017, 446: 162-165.
- [8] Yang W, Huo J, Liu H, et al. Extraordinary magnetocaloric effect of Fe-based bulk glassy rods by combining fluxing treatment and J-quenching technique[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 684: 29-33.
- [9] Meng S, Ling H, Li Q, et al. Development of Fe-based bulk metallic glasses with high saturation magnetization[J]. Scripta Materialia, 2014, 81(11):24-27.
- [10] Gschneidner K A, Pecharsky V K. Magnetocaloric materials[J]. Annual Review of Materials Research, 2000, 30(1):387-429.
- [11] Huo J T, Huo L, Men H, et al. The magnetocaloric effect of Gd-Tb-Dy-Al-M (M=Fe, Co and Ni) high-entropy bulk metallic glasses[J]. Intermetallics, 2015, 58: 31-35.
- [12] Chang J, Hui X, Xu Z Y, et al. Ni-Gd-Al metallic glasses with large magnetocaloric effect[J]. Intermetallics, 2010, 18: 1132-1136.
- [13] Law J Y, Ramanujan R V, Franco V. Tunable Curie temperatures in Gd alloyed Fe-B-Cr magnetocaloric materials[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 508: 14-19.
- [14] Zhong X C, Tian H C, Wang S S, et al. Thermal, magnetic and magnetocaloric properties of $\text{Fe}_{80-x}\text{M}_x\text{B}_{10}\text{Zr}_9\text{Cu}_1$ (M=Ni, Ta; $x=0, 3, 5$) amorphous alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 633: 188-193.
- [15] Zhang H Y, Li R, Xu T, et al. Near room-temperature magnetocaloric effect in FeMnPBC metallic glasses with tunable Curie temperature[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2013, 347: 131-135.
- [16] Moreno L M, Blázquez J S, Ipus J J, et al. Magnetocaloric effect of $\text{Co}_{62}\text{Nb}_6\text{Zr}_2\text{B}_{30}$ amorphous alloys obtained by mechanical alloying or rapid quenching[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 115: 17A302.
- [17] Yuan F, Du J, Shen B L. Controllable spin-glass behavior and large magnetocaloric effect in GdNiAl bulk metallic glasses[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(3):032405.
- [18] Tegus O, Brück E, Buschow K H J, et al. Transition-metal-based magnetic refrigerants for room-temperature applications[J]. Nature, 2002, 415: 150-152.
- [19] Pecharsky V K, Gschneidner J K A. Giant magnetocaloric effect in $\text{Gd}_5(\text{Si}_2\text{Ge}_2)$ [J]. Physical Review Letters, 1997, 78: 4494-4497.

(下转第 05105 页)

- 1233-1237.
- [13] Freundlich H. Über die adsorption in lösungen [J]. Zeitschrift für Physikalische Chemie, 1907, 57(1): 385-470.
- [14] Fang Shengqiong, Weng Hongping, Li Xiao, et al. Study on adsorption of zearalenone by hydroxy-Fe intercalated montmorillonite [J]. Journal of Functional Materials, 2016, 47(8): 8143-8148 (in Chinese).
方圣琼, 翁洪平, 李 晓, 等. 羟基铁柱撑蒙脱石吸附玉米赤霉烯酮机理研究 [J]. 功能材料, 2016, 47(8): 8143-8148.
- [15] Han Lang, Tuo Biyang, Yang Hui, et al. Adsorption mechanism of xanthate by zirconium pillared montmorillonite [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2017, 45(5): 729-736 (in Chinese).
韩 朗, 庾必阳, 杨 慧, 等. 锆柱撑蒙脱石对黄药的吸附机理 [J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(5): 729-736.

Preparation of titanium pillared montmorillonite particles and its adsorption of cadmium ions

SONG Xiang^{1,2}, TUO Biyang^{1,2,3}, ZHAO Xuxia¹, CHEN Bingbing¹, LONG Wenjiang¹

(1. Mining College, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Guizhou Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Non-metallic Mineral Resources, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

3. National & Local Joint Laboratory of Laboratory of Engineering for Effective Utilization of Regional Mineral Resources from Karst Areas, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to remove cadmium ions from wastewater, sodium montmorillonite was used as the matrix material, and tetrabutyl titanate was used as the titanium source to prepare titanium pillared montmorillonite. Then, polyvinyl alcohol, sodium alginate and titanium pillared montmorillonite were prepared to prepare titanium pillared montmorillonite particles with a certain mass ratio, and cadmium ion adsorption experiments and particle loss experiments were carried out. The results show that titanium pillared montmorillonite had a large interplanar spacing d_{001} of 3.43 nm. When polyvinyl alcohol:sodium alginate:titanium pillared montmorillonite was 0.6 : 1.0 : 20.0, 0.25 g of granules were added to 100 mg/L of Cd^{2+} wastewater. The adsorption capacity of Cd^{2+} by titanium pillared montmorillonite reached 7.89 mg/g and the removal rate reached 98.63% after 120 min adsorption at 40 °C with pH of 6. The adsorption of Cd^{2+} by the particles fitted well to the Langmuir isotherm model and the adsorption kinetics followed the pseudo-second-order model.

Key words: Ti pillared montmorillonite; particles; adsorption; cadmium ion

(上接第 05098 页)

Study on magnetocaloric effect of $\text{Fe}_{25}\text{Co}_{25}\text{Ni}_{25}\text{Cr}_5\text{P}_{10}\text{B}_{10}$ high entropy bulk amorphous alloy

WU Kenan¹, LIU Cong¹, LI Qiang¹, HUO Juntao², SUN Yanfei¹

(1. School of Physics Science and Technology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. Ningbo Institute of Materials Technology & Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China)

Abstract: In this work, $\text{Fe}_{25}\text{Co}_{25}\text{Ni}_{25}\text{Cr}_5\text{P}_{10}\text{B}_{10}$ High-entropy bulk metallic glasses (HE-BMGs) with a maximum diameter of 1.2 mm were prepared by combination of fluxing treatment and J-quenching technique. Its magnetocaloric effect (MEC) has been investigated and the effect of high entropy on the magnetocaloric properties of amorphous alloys was studied. The Curie temperature of this HE-BMG was 572 K. The peak values of the magnetic entropy change and refrigerant capacity (RC) of the $\text{Fe}_{25}\text{Co}_{25}\text{Ni}_{25}\text{Cr}_5\text{P}_{10}\text{B}_{10}$ HE-BMG were 0.66 J/(kg · K), 42.9 J/kg and 1.88 J/(kg · K), 136.1 J/kg, respectively, under the applied field of 1.5 and 5 T. Compared of the magnetocaloric properties with other amorphous alloys, the high entropy effect did not have obvious effect on the magnetic entropy change of HE-BMGs. However, the magnetic entropy change curves showed a larger full width at half maximum temperature (ΔT_{FWHM}).

Key words: high-entropy bulk metallic glasses; magnetocaloric properties; high-entropy effect