DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2022.08.003

强磁场对 AlCoCrCuFeNi 高熵合金磁性能的影响

邓　妮,闫育洁,赵　勇,魏　晨,贺一轩,王　军
(西北工业大学 凝固技术国家重点实验室,陕西 西安 710072)

摘　要:以 AlCoCrCuFeNi 高熵合金为对象,研究了磁场热处理过程中合金组织结构及磁性能的变化,从原子固溶和相转变两方面分析了磁性变化的原因。结果表明,磁场热处理相对于无磁场能在更短时间内显著优化合金的磁性能。在双相 AlCoCrCuFeNi 高熵合金中,施加磁场热处理相对于无磁场不会导致 FCC 相和 BCC 相晶格常数的变化。磁场热处理后合金各相中磁性元素含量相对无磁场变化不超过 1%。但是磁场热处理相对无磁场促进了 FCC-BCC 相变及改变原子间距。磁场热处理 30 h 时,饱和磁化强度可达 35.87 emu/g,相对无磁场提高了约 24.9%。

关键词:高熵合金;磁场热处理;磁性能;相变

中图分类号:TG156.97　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2022)08-0600-05

Effect of High Magnetic Field on Magnetic Property of AlCoCrCuFeNi High-Entropy Alloy

DENG Ni, YAN Yujie, ZHAO Yong, WEI Chen, HE Yixuan, WANG Jun
(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The microstructure and magnetic properties of AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy during magnetic field heat treatment were studied. The reason of magnetic property change was analyzed in terms of atomic solution and phase transition. The results show that magnetic field heat treatment can significantly optimize the magnetic properties of the alloy in a shorter time than that without magnetic field. In the dual-phase AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy, applying magnetic field heat treatment does not lead to the change of lattice constants of FCC phase and BCC phase and the change of magnetic elements content in each phase is less than 1% compared with that heat treated without magnetic field. However, applying magnetic field heat treatment promotes the FCC-BCC phase transition and changes the atomic spacing compared with non-magnetic field heat treatment. The saturation magnetization reaches 35.87 emu/g when the alloy is heat treated for 30 h with 10 T magnetic field, which is about 24.9% higher than that without magnetic field.

Key words: high-entropy alloy; magnetic field heat treatment; magnetic property; phase transition

高熵合金是 21 世纪初提出的一种不同于传统合金设计理念的新型材料,是由 5 种或 5 种以上金属元素以等摩尔比或近等摩尔比混合形成的以固溶体结构为主的合金[1-2]。高熵合金特殊的组织结构赋予其优良的综合性能[3-4]。继其优异的力学性能表现之后,功能性也逐渐被发现。其中,磁性能成为了研究者重点关注的对象之一[5-9]。具有优良软磁性能的高熵合金在各大制造业和通讯电子业具有广阔的应用前景。因此,许多研究集中于高熵合金磁性能的调控,期望通过改变制备工艺[9-10]、合金化元素调整[5-6, 11-12]和热处理[6,13-14]等传统方法来获得优良的磁性材料。

强磁场作为一种物理场,可以将强大的能量密度以无接触的方式传递给材料的原子尺度。金属材料在磁场环境下进行合成制备、机械加工及热处理等过程已被广泛应用[15-18]。将强磁场作用于合金的热处理过程,对合金的元素扩散[19]、织构取向[20]、相变/相析出[18, 21]等行为产生显著影响,从而实现对合金组织与性能的调控。Yang 等[15]发现,当退火温度低于居里温度 T_c 时(Curie temperature, T_C 居里温度),磁场热处理可有效提高 $Ce_{17}Fe_{76.5}Co_1Zr_{0.5}B_6$ 合金的磁性能,样品在 438 K 及 1 T 磁场热处理下的剩余磁化强度 B_r、矫顽力 H_c 和最大磁能积$(BH)_{max}$ 分别比未加磁场处理样品提高了 9.8%、3.4%和18.7%。Rehman 等[16]选取 AlNiCo 合金中低于富 Fe-Co 相居里温度的温度进行磁场退火,Fe-Co 相沿外加磁场方向优先生

收稿日期:2022-07-19
基金项目:国家自然科学基金(52174275);陕西省创新能力支撑计划(2020KJXX-073);凝固技术国家重点实验室自主课题(2021-TS-01)
作者简介:邓　妮(1998—),硕士研究生.研究方向:强磁场下金属材料的热处理.电话:18729457759, Email: dengni202011@163.com
通讯作者:王　军(1985—),教授.研究方向:金属材料及其凝固行为.电话:02988460568, Email:nwpuwj@nwpu.edu.cn

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

长，从而获得了最佳的磁性能。

过渡族金属元素中包含了许多磁性元素且资源丰富，基于磁性主元 Fe、Ni 和 Co 的添加以及其他元素的配比是磁性高熵合金的设计方法之一。本文采用 AlCoCrCuFeNi 高熵合金作为研究对象，通过磁场热处理实现对合金磁性能的优化，为高熵合金磁性潜能开发提供了一种新的思路。

1　实验材料与方法

将纯度为 99.95%的 FeCoCr 中间合金及 NiAlCu 中间合金按照等原子比配比，用感应熔炼的方法制备成 AlCoCrCuFeNi 高熵合金铸锭。为保证铸锭组织均匀，晶粒细小，将合金铸锭切割出 60 g 左右的物料，采用高真空非自耗电弧熔炼炉将切割下来的块体重熔，在氩气的保护下反复熔炼 4~5 次，得到了基于铜模真空吸铸的尺寸为 10 mm×15 mm×30 mm 的板材试样。将试样切割成 10 mm×7 mm×10 mm 的块体并真空封装在玻璃管中，放置于自行搭建的强磁场材料处理装置中进行有无磁场热处理。热处理参数为：以 60 K/min 的升温速率将合金加热至 1 200 ℃，分别在无磁场及 10 T 磁场条件下保温 5、10、20、30 h，随后水淬冷却。

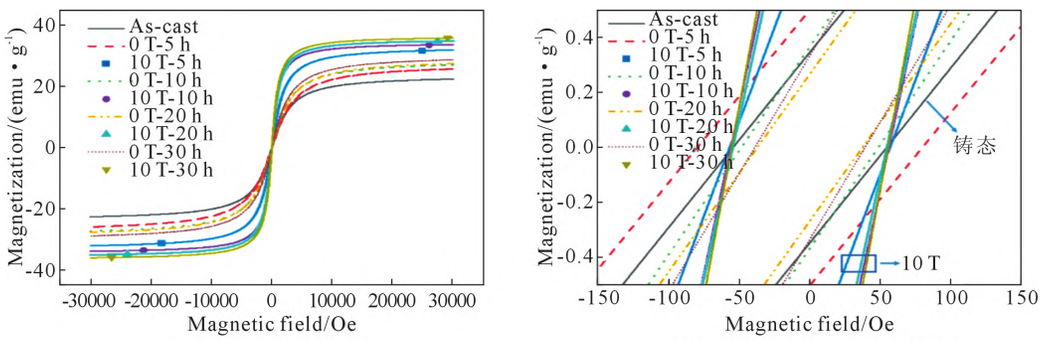
对不同热处理条件所得试样进行切割、打磨、机械抛光。采用多晶 X 射线衍射仪对高熵合金进行相结构分析，工作参数为：Cu 靶 Kα（波长 λ=0.154 06 nm）、工作电压 40 kV、工作电流 30 mA、扫描角度 20°~100°、扫描速度 4 (°)/min。采用 TESCAN MIRA3 扫描电子显微镜对试样的显微组织进行观察。通过扫描电镜上配备的能量色散 X 射线光谱(EDS)测定合金中各相元素的分布情况。将样品表面机械抛光后电解抛光，利用电子背散射衍射仪(EBSD) 对不同相的体积分数进行统计。利用德国 Bruker 公司的原子力显微镜(AFM)的磁力模式对未经腐蚀的合金表面磁畴进行观察。用于测定磁滞回线的样品为 ϕ3 mm×3 mm 的小圆柱，采用美国 Quantum Design-PPMS9 型综合物性测量仪内振动样品磁强计测试元件 (Vibrating Sample Magnetometer, VSM 振动样品磁强计)，测量样品室温下的磁滞回线(Magnetic hysteresis loops, M-H 回线)。

2　实验结果及讨论

2.1　磁场热处理对合金磁性能的影响

图 1 是 1 200 ℃下施加或者不施加 10 T 磁场热处理不同时间所获得的 AlCoCrCuFeNi 高熵合金在 -3 T 到 3 T 的外磁场下测得的室温磁滞回线。AlCoCrCuFeNi 高熵合金为软磁性，在外场为 3 T 时已经基本磁化到饱和。延长热处理时间及施加 10 T 磁场对合金饱和磁化强度的影响是显著的。由图 1(a)可见，在同一热处理时间下，施加磁场热处理的合金的饱和磁化强度相对于无磁场更高。其中 10 T-30 h 最高，10 T-20 h、10 T-10 h、10 T-5 h 依次降低，但都高于所有无磁场的值。如图 1(b)所示，相同热处理时间下，施加磁场热处理的合金相对于无磁场下磁化的也更快。

将磁滞回线计算所得不同热处理条件下 AlCoCrCuFeNi 高熵合金在外场为±3 T 下的饱和磁化强度的变化趋势总结如图 2 所示。铸态合金的饱和磁化强度为 22.46 emu/g。无磁场下，随热处理时间增加，合金的饱和磁化强度逐渐增大。无磁场热处理 5、10、20 和 30 h 时，饱和磁化强度分别为 25.81、27.14、27.53 和 28.72 emu/g，热处理 30 h 样品相对铸态饱和磁化强度提高了约 27.8%。施加磁场热处理相对于无磁场，饱和磁化强度的提高更为显著，仅磁场热处理 5 h，饱和磁化强度已达到 31.9 emu/g，明显高于无磁场热处理 30 h 时才能达到的饱和磁化强度值。磁场热处理 30 h 时，饱和磁化强度可达 35.87 emu/g，相对铸态提高了约 59.7%。即磁场热处



(a) 室温磁滞回线　　(b) 磁滞回线原点处放大图

图 1　1 200 ℃下不同热处理时间、施加或不施加 10 T 磁场所获得的 AlCoCrCuFeNi 高熵合金，在 -3 T 到 3 T 的外磁场下测得的室温磁滞回线

Fig.1　The room temperature magnetic hysteresis loops tested under ±3 T magnetic field of AlCoCrCuFeNi high-entropy alloys heat treated at 1 200 ℃ for different time with or without 10 T magnrtic field

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

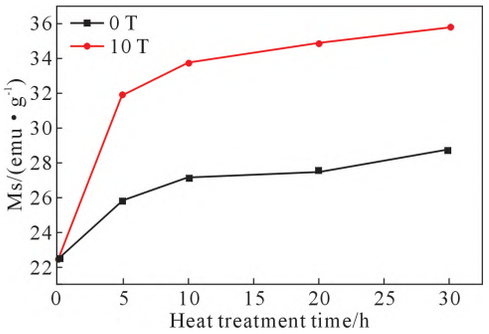


图 2 不同热处理时间条件下的 AlCoCrCuFeNi 高熵合金的饱和磁化强度随热处理时间的变化趋势

Fig.2 Variation of saturation magnetization of AlCoCrCuFeNi high-entropy alloys with heat treatment time

理相比于无磁场能在更短时间内显著优化合金磁性能。此外，在图中也可总结出饱和磁化强度的变化趋势。有无磁场下，随热处理时间延长，饱和磁化强度的增加均呈近抛物线式。无磁场下热处理 10 h 时相对铸态，饱和磁化强度提高了 4.68 emu/g；超过 10 h 后，继续热处理 20 h，饱和磁化强度的增量不超过 2 emu/g。磁场热处理下饱和磁化强度的变化趋势也类似，证明经热处理 10 h 的合金已基本磁化到饱和状态，在此基础上延长热处理时间既消耗大量能源，又对合金磁性的优化意义不大。

2.2 磁场热处理对合金相变的影响

高熵合金的相结构、微观组织(组织粗细、形状和分布) 以及铁磁性元素的含量都会对磁性能产生影响[5-14]。饱和磁化强度的大小主要受铁磁性元素的含量、相结构及原子固溶影响。

首先，考虑相结构的变化对合金磁性能的贡献。图 3(a)是对铸态合金进行热处理后所获得的典型等轴晶微观组织形貌。结合左上角 EBSD 图(蓝色代表 BCC 相，红色代表 FCC 相)，标号为“1”的相为 BCC 结构，标号为“2”“3”的相为 FCC 结构。通过对合金中不同相的磁畴进行观察，揭示不同相的磁性差异。由于原子力显微镜的探针是垂直磁化的，当针尖磁化方向与样品内磁畴磁化强度沿着垂直表面分量的方向相反时，两者互相吸引，为明亮区域，反之为暗区，故明暗的强弱反映了磁畴磁矩沿垂直表面分量的大小。图 3(b)为图 3(a)中黑色方框内组织的磁畴分布图。在室温下，合金 BCC 相中具有明暗对比的磁畴，而 FCC 相中并未观察到磁畴，证明 BCC 相在室温下为磁性相。对磁场热处理 5 h 合金不同相的体积分数进行了统计，利用 EBSD 扫描的区域大于 1 mm×1 mm。数据结果显示，磁场热处理后 BCC 相的体积分数相对无磁场从 56.6%增加到 61.3%。可见磁场热处理促进了 FCC 到 BCC 相变。结合文献报道[22]，AlCoCrCuFeNi 高熵合金为双相结构，因此总饱和磁化强度的计算可由下式完成：

$$M_{s,total}=V_{FCC}M_{s,FCC}+V_{BCC}M_{s,BCC} \quad (1)$$

$$V_{BCC}+V_{FCC}=1 \quad (2)$$

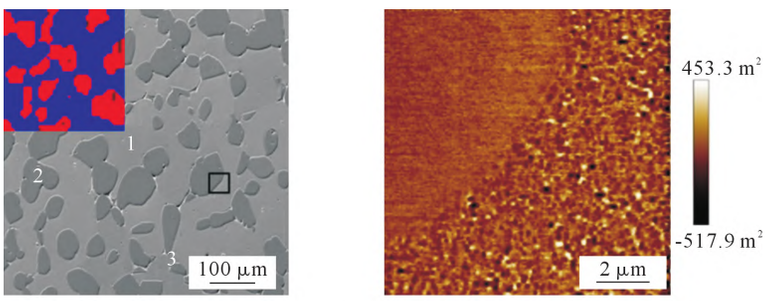
$$\Delta M_s=(M_{s,BCC}-M_{s,FCC})\Delta V_{BCC} \quad (3)$$

式中，$M_{s,BCC}$ 为 BCC 相的饱和磁化强度；$M_{s,FCC}$ 为 FCC 相的饱和磁化强度；V_{BCC} 为 BCC 相的体积分数；V_{FCC} 为 FCC 相的体积分数。

合金在磁场热处理5 h 后，BCC 相的体积分数相对无磁场提高了约 5%，饱和磁化强度从 25.81 emu/g 增加到 31.90 emu/g，增量为23.6%。即 ΔV_{BCC} 和 ΔM_s 皆为正值，证明 BCC 相的饱和磁化强度大于 FCC 相。磁性相体积分数的增加必然会导致饱和磁化强度的增大。然而，BCC 相即磁性相的体积分数的提高贡献了饱和磁化强度增量的 5%，其余约 18%的饱和磁化强度增量仍应考虑合金中铁磁性元素含量的变化及原子固溶等因素的贡献。

2.3 磁场热处理对合金固溶度的影响

合金不同相中原子固溶度的变化和原子之间的最近邻距离变化均会影响磁性[5,24]。Chaudhary 等[5]发现在单相 FCC 结构 FeCoNiCr 高熵合金中添加非磁性元素 Cu 后，形成了双 FCC 相的 FeCoNiCrCu 高熵合金，低温饱和磁化强度和居里温度得到提高。原子探针层析成像揭示了在 FeCoNiCrCu 高熵合金的 FCC 基体中形成了含 5 at.% Ni 和 1 at.%的 Fe、Co、



(a) 微观组织图　　(b) 图(a)方框中组织的磁畴分布

图 3 无磁场热处理 5 h 时 AlCoCrCuFeNi 高熵合金的微观组织图

Fig.3 Microstructure of AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy heat treated 5 h without magnetic field

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Cr 的富 Cu 团簇，导致 FCC 基体中 Co 和 Fe 的体积分数增加，正交换作用增加，基体成分改变导致其磁性改变。由于在 AlCoCrCuFeNi 高熵合金中，Fe、Co 和 Ni 为铁磁性元素，Cu 为抗磁性，Al 为顺磁性，Cr 为反铁磁性，以等摩尔比化合制备而成，有无磁场热处理并不改变合金的宏观磁性元素含量。但是，由上述分析可知，该合金为双相结构，且 BCC 相具有铁磁性，FCC 相磁性相对较小。如 Wei 等[23]所报道的，在 Fe-Co-Ni 基高熵合金中，BCC 结构比 FCC 和非晶结构更有利于引入更高的 Fe 和 Co 磁矩。因此，考虑磁场热处理相对于无磁场热处理过程中，BCC 相中的铁磁性元素 Fe、Co 和 Ni 的固溶度的变化。利用 XRD 对合金的结构进行分析，结果如图 4 所示。有无磁场热处理，合金均由 BCC 和 FCC 双相组成。施加磁场热处理后，并没有观察到衍射峰的移动。对有无磁场热处理 5 h 合金中不同相的晶格常数进行计算，FCC 相被标定为 Cu 晶格，BCC 相被标定为 Fe-Cr 晶格，计算结果如表 1 所示。可见磁场热处理并未引起 FCC 相及 BCC 相晶格常数的显著变化，数据波动在计算误差范围内。对图 3 所示合金中不同相的成分进行表征，探究磁场热处理下磁性元素含量的变化。EDS 结果如表 2 所示，磁场热处理与无磁场热处理相比，在 3 种衬度相中磁性元素含量变化不超过 1%，元素含量的波动在误差范围之内。因此判断磁场热处理相对于无磁场，磁性能的提高与固溶度关系很小。

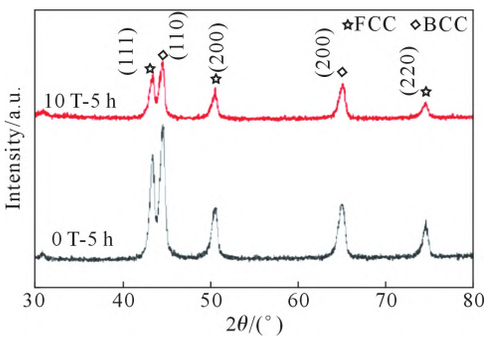


图 4　有无磁场热处理 5 h 的 AlCoCrCuFeNi 高熵合金的 XRD 图

Fig.4　XRD pattern of AlCoCrCuFeNi high-entropy alloys heat treated for 5 h with and without 10 T external magnetic field

表1 有无磁场热处理5 h的AlCoCrCuFeNi高熵合金中不同相的晶格常数

Tab.1 Lattice constants of different phases in AlCoCrCuFeNi high-entropy alloys heat treated 5 h with and without 10 T magnetic field

磁场强度	FCC (Å)	误差(Å)	BCC (Å)	误差(Å)
0 T	3.608 79	0.001 274	2.875 79	0.001 515
10 T	3.607 06	0.001 539	2.877 62	0.002 179

表 2 有无磁场热处理 5 h 的 AlCoCrCuFeNi 高熵合金中各组成相的元素分布

Tab.2 Element distribution in different phases of AlCoCrCuFeNi high entropy alloys heat treated for 5h with and without 10T external magnetic field

相	磁场	Al/at.%	Cr/at.%	Fe/at.%	Co/at.%	Ni/at.%	Cu/at.%
1	0 T	15.35	15.22	15.82	16.58	20.67	16.37
	10 T	15.36	15.92	15.02	16.06	21.39	16.25
2	0 T	10.79	17.39	18.15	19.01	19.66	15.00
	10 T	10.87	17.42	18.26	18.13	20.06	15.28
3	0 T	12.74	2.89	4.12	4.98	12.75	62.52
	10 T	12.36	2.55	3.23	4.36	13.95	63.54

Bethe-Slater(BS)曲线描述了交换耦合作用和原子间距的关系。例如，对于许多含 Mn 化合物，控制磁有序类型的关键参数是 Mn 原子之间的最近邻距离[24]，其中较大的间距会导致铁磁性，而较小的最近邻距离通常与反铁磁性序相关。因此，原子间距的变化对合金磁性有很大的影响。在该合金中，相变及固溶度的变化对合金中饱和磁化强度增加的贡献占比较小，其余饱和磁化强度的增量来源于原子内部间距的变化。对于更深层次微观尺度的表征，将是我们后续需要开展的课题。

3　结论

(1)AlCoCrCuFeNi 高熵合金在室温下为软磁性，磁场热处理相对于无磁场能在更短时间内显著优化合金磁性能。磁场热处理 30 h 时，饱和磁化强度可达 35.87 emu/g，相对铸态提高了约 59.7%。

(2)室温下，AlCoCrCuFeNi 高熵合金中的 BCC 相中存在磁畴，磁性大于 FCC 相。磁场热处理后BCC 相的体积分数从 56.61%增加到 61.35%。即铁磁性 BCC 相体积分数增加，促进了饱和磁化强度的提高。

(3)有无磁场热处理，合金均由 BCC 相和 FCC 相组成。施加磁场热处理不会导致 FCC 相和 BCC 相晶格常数的变化，磁场热处理的 3 种衬度相中磁性元素含量相对无磁场热处理变化不超过 1%。

(4)磁场热处理相对于无磁场，相变及磁性原子固溶度的变化对 AlCoCrCuFeNi 高熵合金磁性能提高的贡献较小，原子间距的变化是导致合金磁性变化的重要因素。

参考文献：

[1] CANTOR B. Multicomponent high-entropy Cantor alloys[J]. Progress in Materials Science, 2021, 120: 100754.

[2] SATHIYAMOORTHI P, KIM H S. High-entropy alloys with heterogeneous microstructure: Processing and mechanical properties [J]. Progress in Materials Science, 2022, 123: 100709.

[3] WANG M L, LU Y P, WANG T M, et al. A novel bulk eutectic

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

high-entropy alloy with outstanding as-cast specific yield strengths at elevated temperatures[J]. Scripta Materialia, 2021, 204: 114132.

[4] 李洪超,王军,袁睿豪,等. AlCoCrFeNi 系高熵合金的强化方法研究[J]. 材料导报,2021, 35(17): 17010-17018.

[5] CHANDHARY V, SONI V, GWALANI B, et al. Influence of non-magnetic Cu on enhancing the low temperature magnetic properties and Curie temperature of FeCoNiCrCu(x) high entropy alloys[J]. Scripta Materialia, 2020, 182: 99-103.

[6] CHEN C, WANG W, LI H N, et al. Effects of Al and Mn on mi crostructure, magnetic and mechanical properties of $Fe_{40}Co_{40}Ni_{10}M_{10}$ (M=Al, Mn) medium entropy alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 890: 161779.

[7] 任县利,张伟伟,伍晓勇,等. 高熵合金短程有序现象的预测及其对结构的电子、磁性、力学性质的影响[J]. 物理学报,2020, 69 (4): 046102.

[8] HAN L L, RAO Z Y, SOUZA FILHO I R, et al. Ultrastrong and ductile soft magnetic high-entropy alloys via coherent ordered nanoprecipitates[J]. Advaned Materials, 2021, 33(37): 2102139.

[9] NARTU M S K K Y, TAGETIA A, CHAUDHARY V, et al. Magnetic and mechanical properties of an additively manufactured equiatomic CoFeNi complex concentrated alloy[J]. Scripta Materialia, 2020, 187: 30-36.

[10] ZHANG B, DUAN Y P, CUI Y L, et al. Improving electromagnetic properties of $FeCoNiSi_{0.4}Al_{0.4}$ high entropy alloy powders via their tunable aspect ratio and elemental uniformity[J]. Materials & Design, 2018, 149: 173-183.

[11] ZHANG Y Z, LI X P, QIN Q D, et al. Influence of Cr and Al to $FeCoNiCr_xAl_{2-x}$ alloys synthesised by mechanochemistry[J]. Materials Science & Technology, 2021, 37(5): 545-551.

[12] ZHU M, ZHANG C, LI K, et al. A novel $CoFe_2NiMn_{0.3}AlCu_x$ high-entropy alloy with excellent magnetic properties and good mechanical properties[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2021, 34: 1557-1564.

[13] DUAN Y P, SONG L L, CUI Y L, et al. FeCoNiCuAl high entropy alloys microwave absorbing materials: Exploring the effects of different Cu contents and annealing temperatures on electromagnetic properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 848: 156491.

[14] VOROBIOV S, PYLYPENKO O, BEREZNYAK Y, et al. Magnetic properties, magnetoresistive, and magnetocaloric effects of AlCrFeCoNiCu thin-film high-entropy alloys prepared by the co-evaporation technique[J]. Applied Physics A, 2021, 127(3): 179.

[15] YANG Y, LI B, CHEN M, et al. Enhanced magnetic properties of $Ce_{17}Fe_{765}Co_1Zr_{05}B_6$ alloys by magnetic field heat treatment[J/OL]. Journal of Rare Earths, 2022. https://doi. org/10. 1016/j. jre. 2022. 06. 015.

[16] REHAMN S U, WEI C, HUANG Q F, et al. Tailoring the microstructure, magnetic properties and interaction mechanisms of Alnico-Ta alloys by magnetic field treatment[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 857: 157586.

[17] 刘昱东,魏晨,闫育洁,等. 强磁场对 CrCoNi中熵合金过冷凝固组织与性能的影响[J]. 铸造技术,2022, 43(5): 346-348.

[18] LI Z H, HOU T P, WU G H, et al. Thermodynamic analysis for the magnetic-field-induced precipitation behaviours in steels [J]. Metals, 2019, 9(8): 909.

[19] WANG F, QIAN D S, HUA L, et al. Effect of high magnetic field on the microstructure evolution and mechanical properties of M50 bearing steel during tempering[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 771: 138623.

[20] ZHANG L, HAN K, ZHANG X, et al. Effect of a high magnetic field on hard magnetic multilayered Fe-Pt alloys[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2019, 490: 165533.

[21] CHEN Z, CONG D, SUN X, et al. Magnetic field-induced magnetostructural transition and huge tensile superelasticity in an oligocrystalline Ni-Cu-Co-Mn-In microwire [J]. IUCrJ, 2019, 6: 843-853.

[22] ZHANG Q, XU H, TAN X H, et al. The effects of phase constitution on magnetic and mechanical properties of FeCoNi $(CuAl)_x$ (x=0-1.2) high-entropy alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 693: 1061-1067.

[23] WEI R, ZHANG H, WANG H Y, et al. Phase transitions and magnetic properties of $Fe_{30}Co_{29}Ni_{29}Zr_7B_4Cu_1$ high-entropy alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 789: 762-767.

[24] ERIKSSON T, BERGQVIST L, BURKERT T, et al. Cycloidal magnetic order in the compound IrMnSi[J]. Physical Review B, 2015, 71(17): 174420.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net