

# 高熵合金吸波材料的研究进展

赵金强<sup>1,2</sup>, 李兰云<sup>1</sup>, 张蔚冉<sup>2</sup>, 赵国仙<sup>1</sup>

(1. 西安石油大学, 陕西 西安 710065)

(2. 西安稀有金属材料研究院有限公司, 陕西 西安 710016)

**摘要:** 随着吸波材料在军事隐身技术中的应用与发展, 对其性能提出了更高的要求, 开发符合“薄、轻、宽、强”且环境适应性强的吸波材料成为当前研究的热点。高熵合金独特的多主元、高浓度成分组成使之具有成为吸波材料的天然优势, 其优异的软磁性、耐腐蚀性、抗氧化性等综合性能为发展新型吸波材料提供了研究基础。高熵合金吸波材料可以通过主元种类和浓度调节, 微量元素添加以及与其他材料复合等多种调控方法来提高吸波性能。综述高熵合金吸波材料的研究进展, 从材料的制备方法出发, 对其吸波性能的影响因素进行详细的讨论, 最后对高熵合金吸波材料的未来研究方向作出展望。

**关键词:** 高熵合金; 多主元; 制备方法; 复合; 吸波材料

**中图分类号:** TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2024)03-0244-08

**引用格式:** 赵金强, 李兰云, 张蔚冉, 等. 高熵合金吸波材料的研究进展[J]. 中国材料进展, 2024, 43(3): 244-251.

ZHAO J Q, LI L Y, ZHAN W R, *et al.* Research Progress of High-Entropy Alloy Absorbing Materials[J]. Materials China, 2024, 43(3): 244-251.

## Research Progress of High-Entropy Alloy Absorbing Materials

ZHAO Jinqiang<sup>1,2</sup>, LI Lanyun<sup>1</sup>, ZHANG Weiran<sup>2</sup>, ZHAO Guoxian<sup>1</sup>

(1. Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

(2. Xi'an Rare Metal Materials Institute Co. Ltd., Xi'an 710016, China)

**Abstract:** With the application and development of wave-absorbing materials in military stealth technology, higher requirements are put forward for their performance. Developing wave-absorbing materials that are “thin, light, wide, and strong” and with excellent environmental adaptability is a critical research topic. The unique multi-principal elements and high-concentration composition of high-entropy alloy gives them a natural advantage in terms of being wave-absorbing materials. Its excellent soft magnetic properties, corrosion resistance, oxidation resistance, and other comprehensive properties provide a basis for research into the further development of novel wave-absorbing materials. Optimized absorbing properties of high-entropy alloy absorbing materials can be achieved through host element type and concentration regulation, trace element addition, and compounding with other materials. This paper reviews the research progress of high-entropy alloy absorbing materials, discusses in detail the factors influencing their absorbing properties from the preparation methods of the materials, and finally gives an outlook on the future research directions of high-entropy alloy absorbing materials.

**Key words:** high-entropy alloys; multi-principal elements; preparation method; compounding; absorbing materials

## 1 前言

在当前国际形势下, 世界各国都在大力发展隐身技术, 该技术的发展程度已经成为各国军事实力的象征之一。吸波材料作为隐身技术的关键组成部分, 一直以来就是各军事强国角逐的军事高科技热点<sup>[1-3]</sup>。早在 20 世纪初, 吸波材料就被用于军事领域以躲避雷达监测。吸波材料的吸波特性取决于其阻抗匹配和电磁波衰减特性, 它能够促使电磁能转化为热能, 或经干涉相消从根本上

收稿日期: 2022-06-14 修回日期: 2022-10-18

基金项目: 西安市博士后创新基地项目(2021-2); 国家自然科学基金资助项目(52101099, 52201021); 陕西省重点研发计划一般项目(2021GY-233, 2021GY-249)

第一作者: 赵金强, 男, 1998 年生, 硕士研究生

通讯作者: 张蔚冉, 女, 1988 年生, 博士, 高级工程师,

Email: zhangweiranruth@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202206009

消除电磁波<sup>[4]</sup>。目前常用反射损耗 (reflection loss,  $RL$ ) 和  $RL < -10$  dB 的有效吸波频宽 ( $f_E$ ) 这 2 个参数来表征材料的吸波性能。当  $RL < -10$  dB 时表示 90% 的电磁波被吸收；当  $RL < -20$  dB 时表示超过 99% 的电磁波被吸收<sup>[5]</sup>。

随着吸波材料的发展以及应用领域的愈加广泛, 吸波材料不但要满足“厚度薄、质量轻、有效吸波频带宽、吸波性能强”的要求<sup>[6-8]</sup>, 而且还要考虑它在高温、潮湿、酸雨等恶劣环境下使用的稳定性。目前吸波材料主要通过合金化和复合化来提升性能, 高熵合金多主元的合金化组成在吸波材料应用领域具有显著的优势。高熵合金多组分设计产生的 4 种核心效应使它具有良好的力学性能、耐腐蚀耐磨性、抗氧化性和出色的结构稳定性等

特点<sup>[9-16]</sup>, 同时还表现出优异的电化学特性、软磁特性等性能<sup>[17, 18]</sup>, 成为满足上述条件的高质量吸波材料<sup>[19-21]</sup>。高熵合金独特的合金设计理念和显著的高混合熵效应为新型吸波材料的开发与发展提供了一个全新的方向<sup>[22]</sup>。

表 1 总结了近几年报道的高熵合金吸波材料及其复合吸波材料的吸波性能。研究表明, 高熵合金吸波材料能在较薄涂层厚度 (2 mm 左右) 下实现对电磁波的较强吸收, 尤其是高熵合金复合吸波材料表现出宽的有效吸波频带和优异的吸波性能。本文从高熵合金吸波材料的制备方法出发, 对该材料的性能调控方法做出归纳总结, 并在此基础上对其未来发展作出展望。

表 1 部分高熵合金吸波材料及其复合吸波材料的厚度 ( $d$ )、频率 ( $f$ )、最小反射损耗 ( $RL_{\min}$ ) 及有效吸波频宽 ( $f_E$ )

Table 1 Thickness ( $d$ ), frequency ( $f$ ), minimum reflection loss ( $RL_{\min}$ ) and effective absorbing bandwidth ( $f_E$ ) of some high-entropy alloy absorbing materials and their composite absorbing materials

Materials	$d/\text{mm}$	$f/\text{GHz}$	$RL_{\min}/\text{dB}$	$f_E/\text{GHz}$	Ref.
FeCoNiCuZn	1.5	1.96	-14.69	2.5(9.9~12.4)	[23]
FeCoNiCuC <sub>0.04</sub>	1.72	15.28	-61.1	5.1	[24]
FeCoNiCuAl	2	7.84	-19.17	—	[25]
FeCoNiCu <sub>0.5</sub> Al	2	—	-40.05	—	[26]
FeCoNiCuTi <sub>0.2</sub>	2.16	10.86	-47.8	4.76(5.97~10.73)	[27]
FeCoNiCrCuAl <sub>0.3</sub>	1.9	12.4	-40.2	4.48(10.96~15.44)	[28]
FeCoNiCrCuAl <sub>0.3</sub> @Air@Ni-NiO	1.3	16.1	-41.4	4(14~18)	[29]
FeCoNiCrCuAl <sub>0.3</sub> @Air@La <sub>0.8</sub> Ca <sub>0.2</sub> CoO <sub>3</sub>	3.7	6.8	-46.5	1.28(6.4~7.68)	[30]
FeCoNiAlCr <sub>0.9</sub>	2	11.2	-29.72	4.28(9.30~13.58)	[31]
FeCoNiAlCr <sub>0.9</sub>	2.5	7.375	-47.55	—	[32]
FeCoNiCrAl	1.5	10.35	-35.3	2.7(9.2~11.9)	[33]
FeCoNiCrAl <sub>0.8</sub>	2.3	11.9	-41.8	4.7(8.7~13.4)	[34]
FeCoNiCr	5.8	13.84	-60.96	1.76	[35]
Fe <sub>30</sub> Co <sub>30</sub> Ni <sub>30</sub> Si <sub>5</sub> Al <sub>5</sub>	2.3	9.60	-47.03	—	[36]

## 2 高熵合金吸波材料的制备

高熵合金的概念在 2004 年由学者 Yeh 等<sup>[37]</sup>与 Cantor 等<sup>[38]</sup>同时提出。高熵合金突破传统合金性能极限的特点, 使它在核工业、生物医学等领域, 尤其在电磁波吸收领域表现出巨大的应用前景。高熵合金吸波材料的制备方法如图 1 所示。

机械合金化法是制备高熵合金的常用方法之一, 同时更是制备高熵合金吸波材料最为广泛且最为基础的方法之一。这是一种自上而下的固态非平衡方法, 依赖于固态成分元素的相互扩散, 通过高能球磨使粉末颗粒在球磨过程中发生反复的塑性变形、冷焊、断裂和重新焊

接, 最终制备出均匀的纳米晶材料<sup>[39]</sup>。将机械合金化制备的高熵合金进一步通过蚀刻法处理可以获得多孔结构的高熵合金吸波材料, 或者通过热处理工艺降低高熵合金吸波材料的内应力, 以提高其吸波性能。电弧熔炼法则是利用电能电极与电极或电极与被熔炼物料之间产生电弧来熔炼金属。通过电弧熔炼, 使金属产生合金化, 元素分布均匀, 进一步结合甩带、退火热处理以及机械合金化方法来制备颗粒细小、分散性更加均匀的高熵合金吸波材料。目前高熵合金吸波材料的制备方法还不完善, 但随着它们在电磁吸波领域的广泛应用和快速发展, 人们对性能优异的高熵合金吸波材料的制备方法会不断地探索和创新, 该制备体系也将更加丰富。

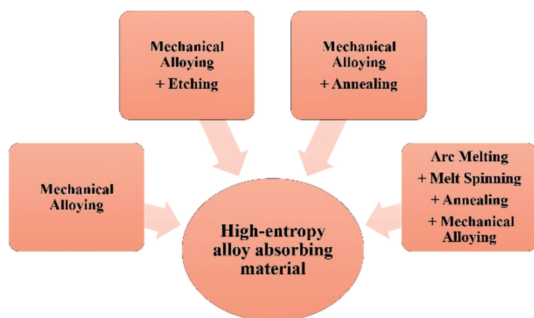


图 1 高熵合金吸波材料的制备方法

Fig. 1 Preparation methods of high-entropy alloy absorbing material

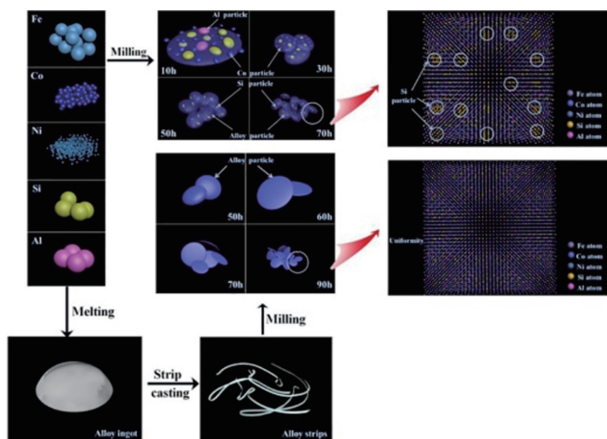
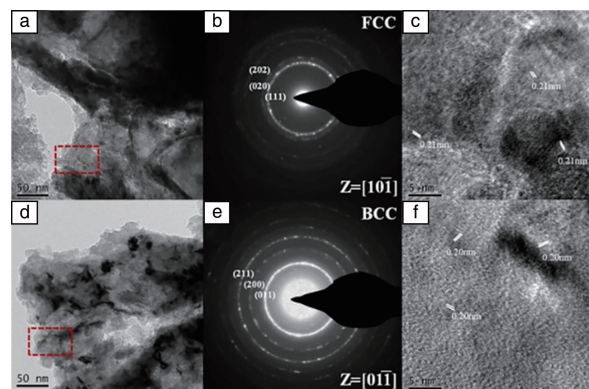
### 3 高熵合金吸波材料的性能优化

高熵合金吸波材料的吸波性能具有高度的可调控性, 可以通过控制形貌结构、调控材料的成分组成、改变原料用量以及调整工艺等多种微观调控机制来提高其吸波性能。

#### 3.1 材料的形貌结构

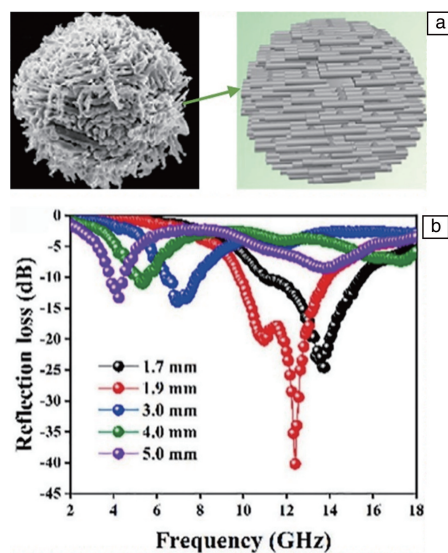
现有的吸波材料微观组织结构有球状、椭球状、片状等, 也有蜂窝状、纤维状等多种结构。不同微观组织形貌和结构所表现出的吸波性能也有所不同, 片状形貌的吸波材料因磁导率提高引起反射损耗减小, 从而具有良好的电磁吸波性能。

Zhang 等<sup>[40]</sup>通过机械合金化和熔融铸带球磨法 2 种方法(图 2)分别制备了成分均为  $\text{FeCoNiSi}_{0.4}\text{Al}_{0.4}$  的 M-HEA 和 C-HEA 高熵合金粉末, 通过 SEM、XRD 等方法 and 矢量网络分析仪等仪器分析这 2 种粉末的组织形貌和电磁性能。结果表明: M-HEA 和 C-HEA 合金扁平片状粉末均为纳米晶(图 3); 相比于 M-HEA 粉末, C-HEA 粉末具有更好的元素分散性、更少的缺陷、更大的长径比以及更大的复介电常数虚部和复磁导率。C-HEA 较 M-HEA 在高频下具有更好的吸波性能, 这是因为在不考

图 2 M-HEA 和 C-HEA 合金粉末形成的流程示意图<sup>[40]</sup>Fig. 2 Schematic diagram of the process flow of M-HEA and C-HEA alloy powder formation<sup>[40]</sup>图 3 M70-HEA (a~c) 和 C60-HEA (b~f) 的 TEM 照片(a, d)、SAED 图谱(b, e)和 HRTEM 照片(c, f)<sup>[40]</sup>Fig. 3 TEM images (a, d), SAED patterns (b, e) and HRTEM images (c, f) of M70-HEA (a~c) and C60-HEA (b~f)<sup>[40]</sup>

虑阻抗匹配条件下, 较大的复介电常数虚部和复磁导率有利于提高材料的吸波能力。

片状、块状等形状的高熵合金吸波材料表面更光滑致密, 电磁波入射会在其表面形成反射, 导致阻抗匹配较差, 使材料吸波性能减弱。Lan 等<sup>[28]</sup>以机械合金化制备的球形高熵合金为模板, 采用硝酸/硝酸铜溶液蚀刻高熵合金模板, 成功制备出多孔中空结构的  $\text{FeCoNiCrCuAl}_{0.3}$  电磁吸波材料。研究表明: 多孔结构使该高熵合金的比表面积增大, 其不均匀的表面更加有利于电磁波的吸收(图 4a); 当厚度为 1.9 mm 时, 该电磁吸波材料在 12.4 GHz 处具有最小反射损耗, 为 -40.2 dB, 低于 -10 dB 的最大有效吸波频带宽度为 4.48 GHz(图 4b)。这种设计思路对开发新型吸波材料具有重要的参考价值。

图 4  $\text{FeCoNiCrCuAl}_{0.3}$  的多孔中空结构示意图(a)和反射损耗图(b)<sup>[28]</sup>Fig. 4 The porous hollow structure schematic diagram (a) and reflection loss diagram (b) of  $\text{FeCoNiCrCuAl}_{0.3}$ <sup>[28]</sup>



### 3.2 材料的组分和配比

在高熵合金吸波材料中调控材料的元素组成,可以改善其电磁参数,进而影响电磁吸波性能。比如 Fe, Cu, Ni 等金属元素可以使合金具有更好的磁损特性,但也会导致阻抗不匹配,使材料的电磁损耗能力不佳,因此需要在合金中添加别的元素使材料以提升吸波性能。同时高熵合金吸波材料中成分元素的含量对其电磁吸波性能也有影响。

Liu 等<sup>[41]</sup>通过机械合金化方法制备  $\text{FeCoNiCr}_{0.4}\text{Cu}_x$  高熵合金。Cu 元素的加入使得合金晶格畸变和内应力增大,从而使  $\text{FeCoNiCr}_{0.4}\text{Cu}_x$  高熵合金颗粒具有更大的长径比,并获得双相纳米晶和非晶结构。随着 Cu 元素含量

的增大,当  $x = 0.2$  时,  $\text{FeCoNiCr}_{0.4}\text{Cu}_{0.2}$  合金在 484 MHz 时的最小反射损耗为  $-33.6$  dB(图 5a)。通过调整样品厚度,其有效吸收带宽(反射损耗  $< -10$  dB)几乎可以覆盖整个 MHz 频率范围。该研究利用高熵合金的“鸡尾酒效应”,通过添加适当的 Cu 元素,提高了合金在 MHz 频率范围内电磁波的吸收性能。Duan 等<sup>[32]</sup>也采用机械合金化法制备了片状  $\text{FeCoNiAlCr}_x$  高熵合金。他们通过添加 Cr 元素使粉体形貌更加扁平,表面极化增大,进而引起了合金电磁参数的变化。当  $x = 0.9$  时,  $\text{FeCoNiAlCr}_{0.9}$  合金在 8.23 GHz 时的最小反射损耗为  $-26.88$  dB。随着 Cr 元素比例的增大,合金反射损耗增强,并逐渐向低频区移动(图 5b)。

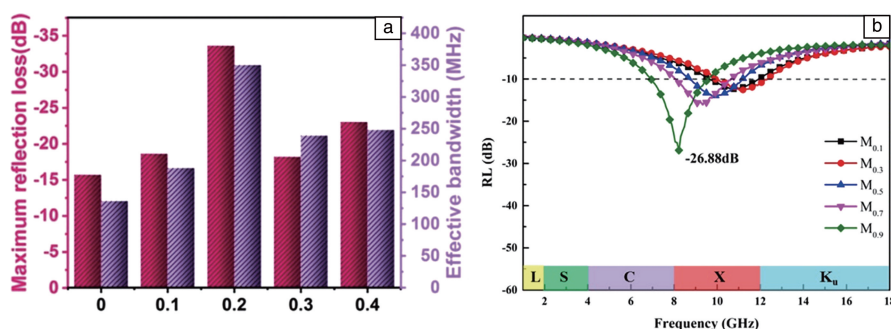


图5 室温下  $\text{FeCoNiCr}_{0.4}\text{Cu}_x$  (15 mm) 的反射损耗和有效吸收频宽图( $x = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ ) (a)<sup>[41]</sup>,  $\text{FeCoNiAlCr}_x$  (2.5 mm) 的反射损耗图(b)<sup>[32]</sup>

Fig. 5 Reflection loss and effective absorption bandwidth diagram of  $\text{FeCoNiCr}_{0.4}\text{Cu}_x$  (15 mm) at room temperature ( $x = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ ) (a)<sup>[41]</sup>, reflection loss diagram of  $\text{FeCoNiAlCr}_x$  (2.5 mm) (b)<sup>[32]</sup>

### 3.3 热处理工艺和工艺参数的改变

优化热处理工艺是提高高熵合金吸波材料吸波性能的有效方法之一。在退火条件下,高熵合金粉体的内应力下降,晶粒尺寸和结晶度增加,有利于磁化饱和和强度的提高及吸波性能的改善。

Duan 等<sup>[26]</sup>研究了在不同退火温度下  $\text{FeCoNiCu}_{0.5}\text{Al}$  合金的电磁吸波性能。随着退火温度的升高,合金中 fcc 相增多而 bcc 相减少,直至在 500 °C 退火温度下形成了单一的 fcc 相。退火后的合金内应力减小且粒度分布均匀,产生的新相  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  促使材料磁饱和和强度增大,电磁吸波性能增强,反射损耗减小。在 500 °C 退火温度下,厚度为 2 mm 时,该合金最小反射损耗为  $-40.05$  dB(图 6a)。经过退火热处理工艺后合金的反射损耗减小,吸波性能增强。同时 Duan 等还研究了退火热处理工艺对  $\text{FeCoNiAlCr}_{0.9}$  合金<sup>[32]</sup>和  $\text{FeCoNiCuAl}$  合金<sup>[25]</sup>吸波性能的影响。研究发现:经过退火,  $\text{FeCoNiAlCr}_{0.9}$  合金的最小反射损耗从  $-26.88$  dB(8.23 GHz)减小至  $-47.55$  dB(7.375 GHz),吸波性能提高(图 5b 和图 6b);从图 7 中可以明显地看出退火后球磨 70 h 的

$\text{FeCoNiCuAl}$  合金在高频区的反射损耗较未经过退火处理有所增加,吸波性能也有增加。由此可见,退火热处理工艺对高熵合金吸波材料电磁吸波性能的提高有积极作用。

在机械合金化制备高熵合金吸波材料的过程中,球磨转速、球磨时间、过程控制剂(process control agent, PCA)的种类或含量等工艺参数的不同会导致材料吸波性能产生变化。Duan 等<sup>[31]</sup>研究了 PCA(无水乙醇)的含量对  $\text{FeCoNiAlCr}_{0.9}$  合金电磁吸波性能的影响。研究发现,PCA 的加入削弱了冷焊的程度,从而促进了更大长径比颗粒粉末的形成。随着 PCA 含量的提高,高熵合金粉末的结晶度有所提高,晶格畸变减少,合金粉末与磨球之间的直接作用减弱,内应力减小的同时矫顽力也有所减小,磁化饱和和强度增加,反射损耗提高且有效吸收频带宽度拓宽,使得合金电磁吸波性能得到加强。加入 50 mL 无水乙醇 PCA 制备的  $\text{FeCoNiAlCr}_{0.9}$  合金具有最佳吸波性能。如图 8 所示,当厚度为 2 mm 时,  $\text{FeCoNiAlCr}_{0.9}$  在 11.2 GHz 的最小反射损耗达到  $-29.72$  dB,有效吸波频带宽度( $RL < -10$  dB)为 4.28 GHz。



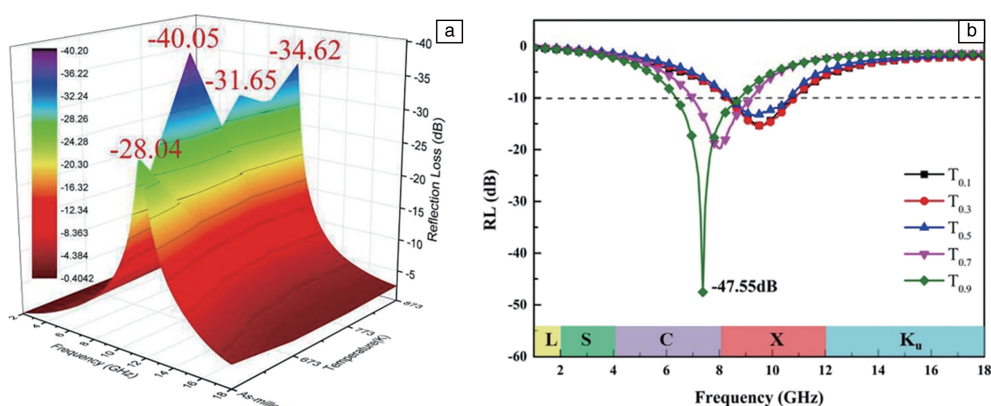


图 6 不同退火温度下  $\text{FeCoNiCu}_{0.5}\text{Al}$  (2 mm) 的反射损耗-频率曲线 (a)<sup>[26]</sup>, 退火后  $\text{FeCoNiAlCr}_x$  (2.5 mm) 的反射损耗图 (b)<sup>[32]</sup>

Fig. 6 Reflection loss-frequency curves of  $\text{FeCoNiCu}_{0.5}\text{Al}$  (2 mm) at different annealing temperatures (a)<sup>[26]</sup>; reflection loss diagram of  $\text{FeCoNiAlCr}_x$  (2.5 mm) after annealing (b)<sup>[32]</sup>

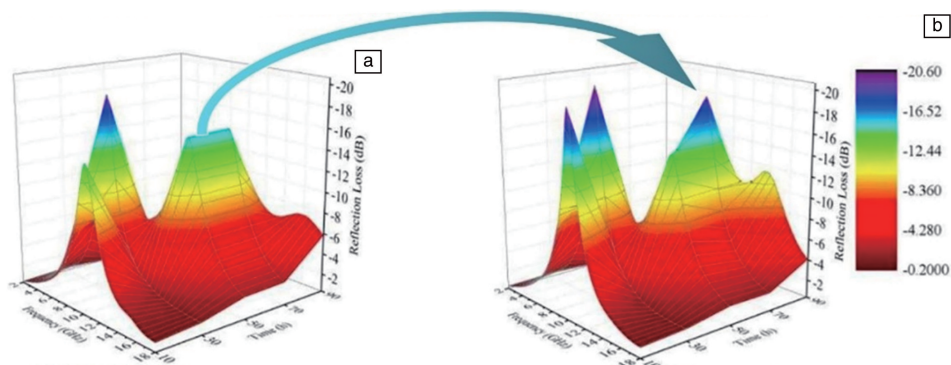


图 7 球磨 70 h (a) 和退火热处理 (b) 后  $\text{FeCoNiCuAl}$  (2 mm) 的反射损耗-频率曲线<sup>[25]</sup>

Fig. 7 Reflection loss-frequency curves of  $\text{FeCoNiCuAl}$  (2 mm) after ball milling (a) and annealing heat treatment (b)<sup>[25]</sup>

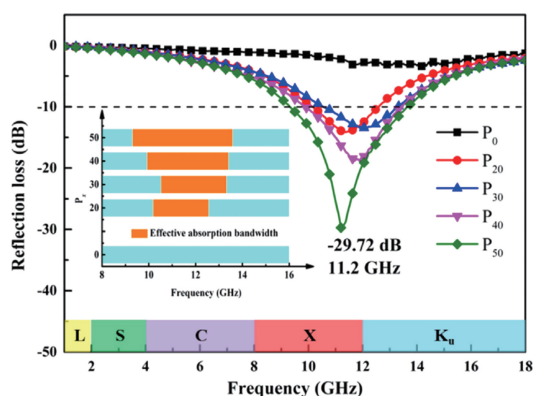


图 8  $\text{FeCoNiAlCr}_{0.9}$  (2 mm) 在不同过程控制剂含量下的反射损耗图<sup>[31]</sup>

Fig. 8 Reflection loss diagram of  $\text{FeCoNiAlCr}_{0.9}$  (2 mm) under different process control agent contents<sup>[31]</sup>

### 3.4 材料的多元复合

目前,单一的高熵合金吸波材料很难实现与自由空间良好的阻抗匹配。为进一步提高材料的吸波性能,高熵合金吸波材料与其他材料的多元复合成为研究热点。高熵合金光滑致密的金属表面导致阻抗失配,不利于电磁波的吸收,而通过构筑多元复合材料可以增大表面极化,实现良好的阻抗匹配,从而提高材料的吸波性能。

Chen 等<sup>[30]</sup>通过水热法和煅烧法成功制备出多孔高熵合金复合材料  $\text{FeCoNiCrCuAl}_{0.3} @ \text{Air} @ \text{La}_{0.8}\text{Ca}_{0.2}\text{CoO}_3$ 。研究表明,以  $\text{FeCoNiCrCuAl}_{0.3}$  高熵合金为核心的复合材料在 350 和 450 °C 煅烧温度的中/低频率下均表现出强的磁损耗能力。随着煅烧温度的升高,该高熵合金最小反射损耗也有较大的变化,在 350 °C 时最小反射损耗为 -38.2 dB,在 450 °C 时最小反射损耗达到了 -46.5 dB (厚度为 3.7 mm,频率为 6.8 GHz,图 9)。值得注意的是在 350

图 11 高熵合金吸波材料及其复合吸波材料与其他微波吸收材料的最小反射损耗对比图<sup>[23, 27-29, 31, 33, 35, 41-53]</sup>

Fig. 11 Comparison of the minimum reflection loss of high-entropy alloy absorbing materials with their composite absorbing materials and other microwave absorbing materials<sup>[23, 27-29, 31, 33, 35, 41-53]</sup>

## 4 结 语

因应用环境的复杂性和时代发展的需求,吸波材料的性能也应更加全面化。高熵合金吸波材料因具有优异的力学性能和突出的功能特性而在隐身技术领域具有广阔的应用前景。高熵合金作为吸波材料在隐身技术领域的研究发展主要集中在以下几个方面:

(1)高熵合金吸波材料的制备工艺具有高度可控性,对高熵合金吸波材料的工艺参数和制备工艺进行设计优化,从而优化阻抗匹配,以获得更大的反射损耗和有效的吸收频宽,进而提高材料的吸波性能。

(2)由于高熵合金自身的定义,其成分设计具有独特的灵活性。因此可以通过调节高熵合金的元素成分和配比来调控材料的晶体形貌和结构,改善合金的阻抗匹配和电磁波衰减特性,从而发现更多吸波性能优异的合金成分。

(3)高熵合金的复合化是提升材料吸波性能的有效手段。高熵合金的复合化是通过磁损耗与介电损耗的协同效应,可达到优化电磁参数,实现高效吸收、宽频带、高耐久性和稳定性等目的,使高熵合金及其复合材料具有更加广阔的应用前景。

## 参考文献 References

- [1] KALLUMOTTALLAL M, HUSSEIN M I, IQBAL M Z. *Frontiers in Materials*[J], 2021, 8: 633079.
- [2] BAE G S, KIM C Y. *Microwave & Optical Technology Letters*[J], 2014, 56(8): 1907-1910.
- [3] MENG F B, WANG H G, HUANG F, *et al.* *Composites Part B*[J], 2018, 137: 260-277.
- [4] BISWAS S, ARIEF I, PANJA S S, *et al.* *ACS Applied Materials & Interfaces*[J], 2017, 9(3): 3030-3039.
- [5] ADEBAYO L L, SOLEIMANI H, YAHYA N, *et al.* *Ceramics International*[J], 2020, 46(2): 1249-1268.
- [6] LIU P B, GAO S, WANG Y, *et al.* *Chemical Engineering Journal* [J], 2020, 381: 122653.
- [7] SONG Q, YE F, KONG L, *et al.* *Advanced Functional Materials*[J], 2020, 30(31): 2000475.
- [8] HUANG Z Y, CHEN H H, HUANG Y, *et al.* *Advanced Functional Materials*[J], 2018, 28(2): 1704363.
- [9] 李杰, 吴凯迪, 牛利冲, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2023, 52(12): 4251-4259.  
LI J, WU K D, NIU L C, *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering* [J], 2023, 52(12): 4251-4259.
- [10] GAO M C. *High-Entropy Alloys Fundamentals and Applications* [M]. Switzerland: Springer, 2016: 151-173.
- [11] SHEIKH S, GAN L, MURAKAMI H, *et al.* *Intermetallics*[J], 2018, 103: 40-51.
- [12] SHI Y Z, COLLINS L, FENG R, *et al.* *Corrosion Science*[J], 2018, 133: 120-131.
- [13] MA S G, ZHANG Y. *Materials Science and Engineering: A* [J], 2012, 532: 480-486.
- [14] SATHIYAMOORTHY P, BASU J, KASHYAP S, *et al.* *Materials & Design*[J], 2017, 134: 426-433.
- [15] MIRACLE D B, SENKOV O N. *Acta Materialia*[J], 2017, 122: 448-511.
- [16] FU Z Q, JIANG L, WARDINI J L, *et al.* *Science Advances* [J], 2018, 4(10): eaat8712.
- [17] KOŽELJ P, VRTNIK S, JELEN A, *et al.* *Advanced Engineering Materials*[J], 2019, 21(5): 1801055.
- [18] FU Z Q, MACDONALD B E, MONSON T C, *et al.* *Journal of Materials Research*[J], 2018, 33(15): 2214-2222.
- [19] GREEN M, CHEN X B. *Journal of Materiomics* [J], 2019, 5(4): 503-541.
- [20] TYAGI S, BASKEY H B, AGARWALA R C, *et al.* *Ceramics International*[J], 2011, 37(7): 2631-2641.
- [21] WEI H Y, ZHANG Z P, HUSSAIN G, *et al.* *Applied Materials Today* [J], 2020, 19: 100569.
- [22] 张勇. 四川师范大学学报(自然科学版)[J], 2022, 45(6): 711-722.  
ZHANG Y. *Journal of Sichuan Normal University (Natural Science)* [J], 2022, 45(6): 711-722.
- [23] ZHANG Y Z, CHEN Y D, QIN Q D, *et al.* *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*[J], 2020, 498: 166151.
- [24] YANG J P, JIANG L W, LIU Z H, *et al.* *Journal of Materials Science & Technology*[J], 2022, 113: 61-70.
- [25] DUAN Y P, CUI Y L, ZHANG B, *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2019, 773: 194-201.
- [26] DUAN Y P, SONG L L, CUI Y L, *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2020, 848(26): 156491.
- [27] YANG J P, LIU Z H, ZHOU H R, *et al.* *ACS Applied Materials & Interfaces*[J], 2022, 14(10): 12375-12384.
- [28] LAN D, ZHAO Z H, GAO Z G, *et al.* *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*[J], 2020, 512: 167065.
- [29] WU H J, LAN D, LI B, *et al.* *Composites Part B: Engineering*[J], 2019, 179: 107524.
- [30] CHEN G, YIN H, LUO B C, *et al.* *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*[J], 2020, 31(8): 6435-6448.
- [31] DUAN Y P, PANG H F, WEN X, *et al.* *Journal of Materials Science & Technology*[J], 2021, 77: 209-216.
- [32] DUAN Y P, WEN X, ZHANG B, *et al.* *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*[J], 2020, 497: 165947.
- [33] YANG P P, LIU Y, ZHAO X C, *et al.* *Advanced Powder Technology* [J], 2016, 27(4): 1128-1133.
- [34] YANG P P, LIU Y, ZHAO X C, *et al.* *Journal of Materials Research* [J], 2016, 31(16): 2398-2406.
- [35] YANG P P, LIU Y, ZHAO X C, *et al.* *Journal of Materials Science:*



- Materials in Electronics[J], 2017, 28(13): 9867–9875.
- [36] ZHANG C, YUAN J H, WANG X, *et al.* Materials Research Express [J], 2021, 8(10): 107524.
- [37] YE H J W, CHEN S K, LIN S J, *et al.* Advanced Engineering Materials[J], 2004, 6(5): 299–303.
- [38] CANTOR B, CHANG I T H, KNIGHT P, *et al.* Materials Science and Engineering: A[J], 2004, 375–377: 213–218.
- [39] VAIDYA M, MURALIKRISHNA G M, MURTY B S. Journal of Materials Research[J], 2019, 34(5): 664–686.
- [40] ZHANG B, DUAN Y P, CUI Y L, *et al.* Materials & Design[J], 2018, 149: 173–183.
- [41] LIU X J, DUAN Y P, YANG X, *et al.* Journal of Alloys and Compounds[J], 2021, 872: 159602.
- [42] SONG C Q, YIN X W, HAN M K, *et al.* Carbon[J], 2017, 116: 50–58.
- [43] ZHANG H, TIAN X Y, WANG C P, *et al.* Applied Surface Science [J], 2014, 314: 228–232.
- [44] YANG Z W, WAN Y Z, XIONG G Y, *et al.* Materials Research Bulletin[J], 2015, 61: 292–297.
- [45] KONG L, YIN X W, ZHANG Y J, *et al.* The Journal of Physical Chemistry C[J], 2013, 117(38): 19701–19711.
- [46] WANG L, LI X, LI Q Q, *et al.* ACS Applied Materials & Interfaces [J], 2018, 10(26): 22602–22610.
- [47] QIU J, QIU T T. Carbon[J], 2015, 81(1): 20–28.
- [48] WANG G Q, CHANG Y F, WANG L F, *et al.* Materials Research Bulletin[J], 2013, 48: 1007–1012.
- [49] SHANENKOV I, SIVKOV A, IVASHUTENKO A, *et al.* Physical Chemistry Chemical Physics[J], 2017, 19: 19975–19983.
- [50] KUMAR A, AGARWALA V, SINGH D. Progress in Electromagnetics Research M[J], 2013, 29: 223–236.
- [51] 刘平安, 王鹏, 叶升, 等. 功能材料[J], 2015, 18(46): 18088–18091.
- LIU P A, WANG P, YE S, *et al.* Functional Materials[J], 2015, 18(46): 18088–18091.
- [52] 李涓碧. 手性(螺旋)基质与钴铁氧体复合物的制备及其电磁性能研究[D]. 浙江: 浙江师范大学, 2015.
- LI J B. Preparation and Electromagnetic Properties of Chiral (Spiral) Substrate and Its Co-Ferrite Composites[D]. Zhejiang: Zhejiang Normal University, 2015.
- [53] QING Y C, WEN Q L, LUO F, *et al.* Journal of Materials Chemistry C[J], 2016, 4: 48–53.
- [54] SINGH S, SHUKLA S, KUMAR A, *et al.* Journal of Alloys and Compounds[J], 2018, 738: 448–460.

(编辑 费蒙飞)