

功率超声电磁复合场对 CuAlMn 形状记忆合金组织和性能的影响

金文中¹, 曹永青¹, 李林芳¹, 李廷举², 殷国茂²

(1. 洛阳理工学院洛阳市先进材料成型技术重点实验室, 河南洛阳 471023;

2. 大连理工大学材料科学与工程学院, 辽宁大连 116024)

摘要: 应用功率超声-电磁复合场来改善CuAlMn形状记忆合金的组织性能。使用扫描电子显微镜、光学显微镜和力学性能测试技术研究了功率超声-电磁复合场对CuAlMn形状记忆合金组织和性能的影响。结果表明: 在CuAlMn形状记忆合金凝固过程中施加600 W功率超声-90 A电磁复合场, 可以得到最佳的晶粒细化效果, 使CuAlMn形状记忆合金铸锭的晶粒组织从1.62 mm细化至0.41 mm; 相应地, CuAlMn形状记忆合金的力学性能得到大幅提高, 其中抗拉强度和伸长率分别提高到674 MPa和18.2%。

关键词: 复合场; CuAlMn形状记忆合金; 凝固组织; 力学性能

作者简介:

金文中(1972-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为材料电磁加工技术。电话: 0379-65928196, E-mail: wenzhong_jin0872@sina.com

中图分类号: TG132.3⁺²
文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2020)09-0934-04

基金项目:

国家自然科学基金(50474055); 河南省高等学校重点科研项目(18A430019); 洛阳理工学院预研项目(2017YZY08)。

收稿日期:

2020-03-23 收到初稿,
2020-05-22 收到修订稿。

Cu 基形状记忆合金具有良好的形状记忆性能, 同时还具有使用成本低等优点, 成为具有重要发展潜力的一类形状记忆合金^[1]。但未经细化的多晶铜基形状记忆合金存在着晶粒粗大、塑性差、易发生晶界开裂、疲劳寿命短、冷加工性能差等问题, 严重制约了其应用范围, 因此晶粒细化是一种提高铜基形状记忆合金性能的有效途径^[2-3]。目前, 铜基记忆合金晶粒细化的方法主要有: 添加微量合金元素法、快速凝固法、粉末冶金法、形变热处理法和电脉冲孕育处理法^[4-5]。

CuAlMn形状记忆合金是新近开发研究的Cu基形状记忆合金, 具有较好的记忆性能、阻尼性能和强度, 是一种具有实际应用价值的Cu基形状记忆合金^[6]。

有学者应用功率超声-电磁复合场处理液态铝合金和镁合金并取得比较好的晶粒细化效果^[7-8]。鉴于此, 本研究尝试应用功率超声-电磁复合场来处理液态CuAlMn形状记忆合金, 通过研究功率超声-电磁复合场对CuAlMn形状记忆合金组织和性能的影响, 以期制备高性能的CuAlMn形状记忆合金提供新的技术途径。

1 试验方法

本试验材料的合金成分为Cu-11.5Al-5Mn (wt%), 采用99.9%纯铜、99.9%纯铝、99.9%电解锰为原料在中频感应熔炼炉中制备。试验装置由中频感应熔炼炉、旋转电磁场发生器、功率超声场发生器和奥氏体不锈钢锭模组成, 锭模尺寸: 高120 mm, 内径 Φ 60 mm。

基体合金熔炼后升温至1 200 °C浇注到奥氏体不锈钢锭模中, 静置5 s后施加功率超声-电磁复合场。功率超声的工艺参数为: 频率20 kHz、功率600 W, 旋转电磁场的工艺参数为: 频率50 Hz, 电流90 A。功率超声-电磁复合场的具体实施方案及其平均晶粒尺寸见表1。

试样宏观组织使用浸蚀剂为: 5 g三氯化铁+10 mL盐酸+100 mL水。试样微观组织使用浸蚀剂为: 2 g硝酸铁+50 mL无水乙醇。在KN-550型万能材料试验机上进行力学拉伸试验。使用德国蔡司Zeiss Axio Observer. A1m型金相显微镜进行高倍金相组织

分析,使用德国蔡司Zeiss Sigma HD型热场发射扫描电子显微镜分析室温力学拉伸试样断口形貌。

2 结果与分析

2.1 复合场对 CuAlMn 形状记忆合金组织的影响

不同细化工艺下CuAlMn形状记忆合金铸锭晶粒组织的特征参数见表1,宏观组织及微观组织见图1、2。

可以看出,CuAlMn形状记忆合金铸态组织为板条状马氏体,晶粒粗大,平均晶粒尺寸为1.62 mm,如图1a、2a所示。

在CuAlMn形状记忆合金凝固过程中施加90 A旋转电磁场,液态金属在旋转电磁场的作用下产生强力电磁搅拌,使已凝固的枝晶破碎并遍布在熔体中提高了形核率,并能加速铸坯内部的传热和传质过程使两相区内的成分过冷增加^[9]。因此使CuAlMn形状记忆合金铸锭的晶粒组织细化至0.97 mm,如图1b、2b所示。

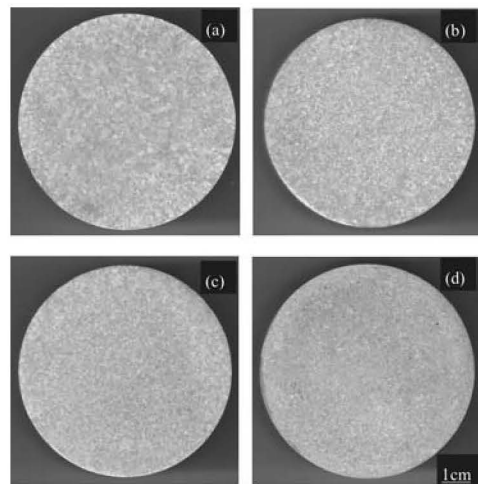
在CuAlMn形状记忆合金凝固过程中施加600 W功率超声场,会在熔体中产生空化效应和声流效应,其中超声空化效应会增加熔体的过冷度,大幅增加熔体中初生晶核数量,促使熔体的爆发生核,而超声声流效应引起的熔体搅动促使初生晶核弥散分布到熔体中^[10]。因而使CuAlMn形状记忆合金铸锭的晶粒组织细化至0.83 mm。但由于功率超声在熔体中的衰减特性使得距离功率超声变幅杆较远处熔体受到的搅动有限^[10]。因此使得和功率超声变幅杆不同距离的各部分凝固组织的尺寸大小不一、均匀性比较差,如图1c、2c所示。

在CuAlMn形状记忆合金凝固过程中施加600 W功率超声-90 A旋转电磁复合场,熔体受到功率超声场和旋转电磁场的共同作用,其中超声空化效应会增加熔体的过冷度,大幅增加熔体中初生晶核数量,促使熔体的爆发生核,而超声声流效应和旋转电磁场两者引起的熔体搅动作用相互叠加,旋转电磁场产生的宏观搅拌效应可以弥补功率超声作用范围小的不足、扩大功率超声的作用范围,对熔体产生更强更充分的搅拌,将大量的初生晶核弥散分布到整个熔体中,同时还使整个熔体的温度场和浓度场更为均匀^[11]。因此和

表1 不同细化工艺下CuAlMn形状记忆合金铸锭平均晶粒尺寸

Table 1 Average grain size of CuAlMn alloy ingots under various refining process conditions

试样编号	电流强度/A	超声功率/W	平均晶粒尺寸/mm
1	0	0	1.62
2	90	0	0.97
3	0	600	0.83
4	90	600	0.41



(a) 试样1; (b) 试样2; (c) 试样3; (d) 试样4

图1 不同细化工艺下CuAlMn形状记忆合金铸锭的宏观晶粒组织
Fig. 1 Macroscopic grain structures of CuAlMn alloy ingots under various refining process conditions

单独施加功率超声或电磁场相比,施加功率超声-电磁复合场将会得到更好的晶粒细化效果,从而使CuAlMn形状记忆合金铸锭的晶粒组织从1.62 mm细化至0.41 mm,如图1d、2d所示。

2.2 复合场对 CuAlMn 形状记忆合金力学性能的影响

在钢、铁、钼、铌、铬、钒和铜合金等许多金属中屈服强度和晶粒大小的关系满足霍尔-佩奇(Hall-Petch)关系式^[12]:



(a) 试样1

(b) 试样2

(c) 试样3

(d) 试样4

图2 不同细化工艺下CuAlMn形状记忆合金铸锭的微观晶粒组织

Fig. 2 Microscopic grain structures of CuAlMn alloy ingots under various refining process conditions

$$\sigma_y = \sigma_i + k_y d^{-1/2} \quad (1)$$

式中： σ_y 为屈服强度， σ_i 和 k_y 是两个和材料有关的常数， d 为晶粒直径^[12]。由式(1)可知，多晶体金属材料的晶粒越细，强度越高^[12]。晶粒细化在提高多晶体金属强度的同时，也使其塑性和韧性提高，因此晶粒细化是目前工业上提高多晶体金属材料力学性能的有效途径^[12]。

表2是不同细化工艺下铸态CuAlMn形状记忆合金的室温力学性能。从表2可以看出，铸态CuAlMn形状记忆合金由于组织粗大，其抗拉强度为435 MPa，伸长率仅为5.4%，塑性比较差。在CuAlMn形状记忆合金凝固过程中施加90 A旋转电磁场，晶粒细化的效果比较明显，因此CuAlMn形状记忆合金的力学性能得到大幅提高，其中抗拉强度提高到561 MPa，伸长率提高到12.5%。在CuAlMn形状记忆合金凝固过程中施加600 W功率超声场，CuAlMn形状记忆合金的力学性能提高幅度也比较大，其中抗拉强度提高到528 MPa，伸长率提高到11.3%。但没有施加旋转电磁场对CuAlMn形状记忆合金的力学性能提高幅度大，其原因在于施加功率超声得到的凝固组织的尺寸均匀性比较差。在CuAlMn形状记忆合金凝固过程中施加600 W功率超声-90 A旋转电磁复合场，得到最佳的晶粒细化效果，因此CuAlMn形状记忆合金的力学性能提高幅度最大，其中抗拉强度提高到674 MPa，伸长率提高到18.2%。

图3是不同细化工艺下铸态CuAlMn形状记忆合金室温拉伸断口的SEM形貌。从图3a可以看出，铸态CuAlMn形状记忆合金室温拉伸试样断口呈现典型的准解理断裂形貌，河流花样短且弯曲，解理面小且周围有较多的撕裂棱。从图3b可以看出，在CuAlMn形状记忆合金凝固过程中施加90 A旋转电磁场，CuAlMn形状记忆合金室温拉伸试样断口呈现准解理断裂和韧性断裂的混合形貌，开始出现比较深的韧窝，撕裂棱的数量也少了很多。从图3c可以看出，在CuAlMn形状记忆合金凝固过程中施加600 W功率超声场，CuAlMn形状记忆合金室温拉伸试样断口同样呈现准解理断裂和韧

表2 CuAlMn形状记忆合金的室温力学性能
Table 2 Mechanical properties of CuAlMn shape memory alloy at room temperature

试样编号	电流强度/A	超声功率/W	抗拉强度/MPa	伸长率/%
1	0	0	435	5.4
2	90	0	561	12.5
3	0	600	528	11.3
4	90	600	674	18.2

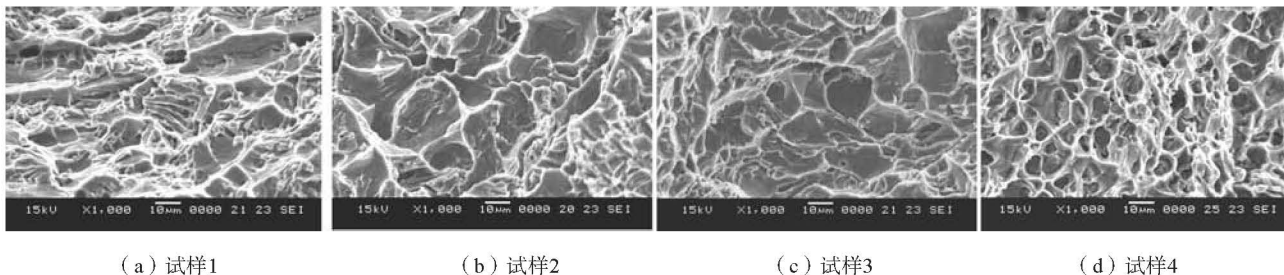
性断裂的混合形貌，也开始出现比较深的韧窝，撕裂棱的数量也少了很多。从图3d可以看出，在CuAlMn形状记忆合金凝固过程中施加600 W功率超声-90 A旋转电磁复合场，CuAlMn形状记忆合金室温拉伸试样断口呈现韧性断裂形貌，韧窝多且深。拉伸断口SEM形貌观察结果进一步验证了功率超声-电磁复合场对CuAlMn形状记忆合金室温力学拉伸性能的改善作用。

3 结论

(1) 在凝固过程中施加90 A的旋转电磁场，可以使CuAlMn形状记忆合金铸锭的晶粒组织得到明显细化，从而使CuAlMn形状记忆合金的力学性能得到大幅提高。

(2) 在凝固过程中施加600 W的功率超声场，能够使CuAlMn形状记忆合金铸锭的晶粒组织也得到明显细化，但各部分凝固组织的尺寸均匀性比较差，因此没有施加旋转电磁场对CuAlMn形状记忆合金的力学性能提高幅度大。

(3) 本试验条件下，在CuAlMn形状记忆合金凝固过程中施加600 W功率超声-90 A电磁复合场，旋转电磁场产生的宏观搅拌效应可以扩大功率超声的作用范围，得到最佳的晶粒细化效果，使CuAlMn形状记忆合金铸锭的晶粒组织从1.62 mm细化至0.41 mm。相应地，CuAlMn形状记忆合金的力学性能得到大幅提高，其中抗拉强度和伸长率分别提高到674 MPa和18.2%。



(a) 试样1

(b) 试样2

(c) 试样3

(d) 试样4

图3 不同细化工艺下CuAlMn形状记忆合金拉伸断口SEM形貌

Fig. 3 Tensile fracture SEM morphology of CuAlMn alloy under various refining process conditions

参考文献:

- [1] LIU J L, CHEN Z H, HUANG H Y, et al. Microstructure and superelasticity control by rolling and heat treatment in columnar-grained Cu-Al-Mn shape memory alloy [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2017, 696: 315–322.
- [2] 黄海友, 王伟丽, 刘记立, 等. Cu基形状记忆合金的应用进展 [J]. *中国材料进展*, 2016, 35 (12): 919–926.
- [3] 黄海友, 王伟丽, 刘记立, 等. 高性能Cu基形状记忆合金组织设计研究进展 [J]. *中国材料进展*, 2016, 35 (11): 835–842.
- [4] YANG J, WANG Q Z, YIN F X, et al. Effects of grain refinement on the structure and properties of a CuAlMn shape memory alloy [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2016, 664: 215–220.
- [5] 巴宏波, 陈庆福. 铜基记忆合金晶粒细化研究现状和发展趋势 [J]. *辽宁工学院学报*, 2004, 24 (5): 52–55.
- [6] 娄明珠, 阎晓东, 王碧文, 等. 晶粒细化对Cu-12.2Al-4.0Mn形状记忆合金加工性能的影响 [J]. *中国有色金属学报*, 1999, 9 (3): 552–555.
- [7] ZHANG Z T, LI J, YUE H Y, et al. Microstructure evolution of A356 alloy under compound field [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 484: 458–462.
- [8] 房灿峰, 王老虎, 孟令刚, 等. 复合场对TiB₂/AZ31复合材料组织和性能的影响 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2014, 43 (3): 585–588.
- [9] YAN Z M, JIN W Z, LI T J. Effect of rotating magnetic field (RMF) on segregation of solute elements in CuNi10Fe1Mn alloy hollow billet [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2012, 21 (9): 1970–1977.
- [10] ZHANG Z T, LI T J, YUE H Y, et al. Study on the preparation of Al-Si functionally graded materials using power ultrasonic field [J]. *Materials and Design*, 2009, 30: 851–856.
- [11] 李捷, 张忠涛, 石婷, 等. 复合场对A356合金凝固行为的影响 [J]. *铸造*, 2009, 58 (7): 681–689.
- [12] 冯端, 师昌绪, 刘治国. *材料科学导论* [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 443–445.

Effects of Compound Field on Solidification Structure and Mechanical Properties of CuAlMn Shape Memory Alloy

JIN Wen-zhong¹, CAO Yong-qing¹, LI Lin-fang¹, LI Ting-ju², YIN Guo-mao²

(1. Luoyang Key Laboratory of Advanced Materials Forming Technology, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, Henan, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract:

Compound field (combination of power ultrasonic field and rotating electromagnetic field) was used to improve the solidification structure and mechanical properties of CuAlMn shape memory alloy. The effects of compound field on the solidification structure and mechanical properties of CuAlMn shape memory alloy were studied by using SEM, OM and electronic universal tester. The results show that the grain refinement effect of the CuAlMn shape memory alloy ingot is the best when the intensity of ultrasonic field is 600 W and the intensity of electromagnetic field is 90 A, and the grain size is decreased from 1.62 mm to 0.41 mm. Accordingly, the tensile properties are significantly improved, and the values of tensile strength and elongation are 674 MPa and 18.2%, respectively.

Key words:

compound field; CuAlMn shape memory alloy; solidification structure; mechanical properties