

交流磁场对 Al-Fe-Sc-Zr 合金组织及硬度的影响

李志伟¹ 周 全¹ 董建军² 陈乐平¹ 魏陈阳¹
(1.南昌航空大学航空制造工程学院;2.南昌航空大学图书馆)

摘 要 利用 OM、XRD、电子布氏硬度计等测试手段,探究了连续交流磁场电压和间断交流磁场的放电频率和占空比对 Al-Fe-Sc-Zr 合金凝固组织和硬度的影响。结果表明,连续和间断交流磁场均可以有效细化合金的凝固组织,其初生 Al₃Fe 相由粗大的长针状变为细小的短棒状,合金的力学性能均有所提高。在 0~300 V 内,随着交流电压增加,初生 Al₃Fe 相长度先增加后减小,转折点后为 100 V;当电压为 100 V 时,初生 Al₃Fe 相聚集在试样边部,且试样心部硬度高于试样边部硬度。当放电频率在 0~10 Hz 内或占空比在 10%~30% 内,随着放电频率或占空比的增加,初生 Al₃Fe 相长度均逐渐减小。合金的布氏硬度与初生 Al₃Fe 相的平均长度基本对应。

关键词 Al-Fe-Sc-Zr 合金;连续交流磁场;间断交流磁场;凝固组织;硬度

中图分类号 TG146.21;TG156.9 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.01.022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of AC Magnetic Field on Structure and Hardness of Al-Fe-Sc-Zr Alloy

Li Zhiwei¹, Zhou Quan¹, Dong Jianjun², Chen Leping¹, Wei Chenyang¹
(1.School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University;
2. Library of Nanchang Hangkong University)

Abstract: Effects of voltage of continuous AC magnetic field as well as discharge frequency and duty cycle of discontinuous AC magnetic field on solidification structure and hardness of Al-Fe-Sc-Zr alloy were explored by means of OM, XRD, electronic brinell hardness tester. The results indicate that both continuous AC magnetic field and discontinuous AC magnetic field can refine grains of the alloy, where primary Al₃Fe phase is transformed from coarse long needle to fine short rod shape, and mechanical properties are all improved. In the range of 0~300 V, with the increase of AC voltage, the length of primary Al₃Fe phase is increased at first and then decreased, and the turning point is 100 V. When the AC voltage is 100 V, the primary Al₃Fe phase gathers at the edge of the specimen, and the hardness of the center part is higher than that of the edge part. When the discharge frequency is 0~10 Hz or the duty cycle is 10%~30%, with the discharge frequency or duty cycle increasing, the length of primary Al₃Fe phase is decreased gradually. Brinell hardness of the alloy basically corresponds to the average length of primary Al₃Fe phase.

Key Words: Al-Fe-Sc-Zr Alloy, Continuous AC Magnetic Field, Discontinuous AC Magnetic Field, Solidification Structure, Hardness

收稿日期:2022-04-14;修改稿收到日期:2022-05-17
基金项目:上海航天科技创新基金资助项目(SAST2019-130)
第一作者简介:李志伟,男,1997 年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail:1786155892@qq.com
通信作者:周全,男,1976 年出生,教授,南昌(330063),E-mail:lgclzq@sina.com
引用格式:李志伟,周全,董建军,等. 交流磁场对 Al-Fe-Sc-Zr 合金组织及硬度的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(1):105-110.
LI Z W, ZHOU Q, DONG J J, et al. Effects of AC magnetic field on structure and hardness of Al-Fe-Sc-Zr alloy[J]. Special Casting & Non-ferrous Alloys, 2023, 43(1):105-110.

缩孔产生。
(3)ZTA15 钛合金安装座铸造工艺二次优化后,批量生产结果表明,铸件无缩孔、缩松,内部品质满足 GJB 2896A-2007 中 II 类铸件要求,X 射线检测合格率达 100%。

参 考 文 献

[1] 陈红,刘宏宇,苏贵桥,等.ZTA15 铸造钛合金材料的性能与应用[J].铸造,2007,56(6):645-647.

[2] 潘恒沛,陈洁明,张利娟,等.ZTA15 钛合金铸件开裂原因分析[J].热处理,2021,36(2):48-50.

[3] 赵群宪,衣延山,王勇杰,等.改进浇注系统解决铸件缩孔缺陷[J].现代铸铁,2012,32(4):51-54.

[4] 许云祥.熔模铸件冒口当量热节设计法[J].特种铸造及有色合金,2006,26(2):108-110.

[5] 罗均强.熔模铸造中铸件缩孔的特殊解决方案[J].特种铸造及有色合金,2010,30(7):652-652.

[6] 李德臣.用热冒口消除消失模铸件缩孔[J].铸造技术,2010,31(6):804-805.

(编辑:刘卫)

铝合金因其较低的密度、优异的延展性及耐蚀性而被广泛应用于各工业领域,尤其是在航空航天和汽车制造业^[1]。Al-Fe 系合金作为新型高性能铝合金,具有更好的耐热、耐腐蚀性和抗蠕变性能,在很多行业有极大的应用潜力^[2]。

为使 Al-Fe 合金能够应用在航天领域,提高其力学性能,需找到控制和细化 Fe 相的有效方法。目前细化和控制 Al-Fe 合金凝固组织的方法有合金化、半固态挤压、热处理及外加物理场^[3,4]。合金化是目前最主要的细化方法,Sc、Zr、Cu、Mn 及稀土等元素均能够有效细化 Al-Fe 合金的凝固组织^[5]。刘波等^[6]发现对 Al-5.5Fe 合金进行半固态挤压后,合金中粗大针片状 Al₃Fe 相发生明显的断裂,细化程度得到了提高。周振平等^[7]发现热处理使 Al-5Fe 合金中小部分初生 Al₃Fe 相呈细小的针状,大部分呈针点状。韩逸等^[8]发现交流磁场对 Al-1.99Fe 合金和 Al-0.9Fe 合金中 Fe 相的形状及分布有明显改善作用。陈东风等^[9]发现电磁分离可以制备 Al-5Fe 自生表层复合材料,而且通过改变磁场时间,可以控制富 Fe 相的迁移,改变其在基体上的分布。

交流磁场凝固处理技术在近几十年里备受关注,其可以明显细化 Al、Mg、Cu、Fe 和钢等合金的凝固组织^[10~15]。但是,近年来,在 Al-Fe 合金中加入 Sc、Zr 并施加连续交流磁场或间断交流磁场的研究相对较少,并且间断交流磁场的耗能少,同时还可以减少焦耳热效应对合金的不利影响。因此,本课题探究了连续和间断交流磁场处理对 Al-Fe-Sc-Zr 合金凝固组织和力学性能的影响,旨在对该合金的凝固组织和力学性能的进一步改善提供参考。

1 试验方法

试验材料为 Al-3Fe-0.3Sc-0.1Zr 合金,其中 Al、Fe、Sc 和 Zr 分别以质量分数为 99.99% 的高纯 Al、Al-10Fe、Al-2Sc 和 Al-5Zr 中间合金的形式加入。试验采用的交流磁场装置见图 1。该装置主要由交流电源、调压器、

可控开关、电磁线圈和耐火砖等组成,其中交流电压由调压器调节,可控开关由时间控制器和固态继电器组成,用来调节间断交流磁场的放电频率和占空比。

采用 SG2-5-10 型坩埚电阻炉熔炼,设定电阻炉内的温度为 850 ℃,待纯 Al 和 Al-10Fe 中间合金完全熔化后加入 Al-2Sc 和 Al-5Zr 合金进行变质处理并保温 30 min;随后以钟罩法加入 2% 的精炼剂,再保温 10 min。当浇注温度为 780 ℃时,将熔体浇注到预热温度为 700 ℃的不锈钢模具中。分别分析了不同的连续交流磁场电压和间断交流磁场的放电频率以及占空比对合金凝固组织和硬度的影响,具体参数见表 1。

表 1 试验工艺参数

Tab.1 Experimental process parameters				
编号	电流作用方式	占空比/%	电压/V	放电频率/Hz
1	连续	100	0	—
2	连续	100	100	—
3	连续	100	200	—
4	连续	100	300	—
5	间断	20	300	2
6	间断	20	300	5
7	间断	20	300	10
8	间断	10	300	5
9	间断	30	300	5

从铸锭底部向上 1/2 半径处截取 $\phi 2.4\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ 的试样;经过研磨、抛光后,用 0.5% 的 HF 水溶液进行腐蚀;利用 XJP-6A 型金相显微镜观察合金中 Al₃Fe 相的形貌;利用 S-Viewer 软件,对 Al₃Fe 相长度进行测量;采用 HBE-3000A 电子布氏硬度计对试样进行硬度测试(未特别说明时,合金硬度测量均在试样边部区域);采用 WDW-200D 万能试验机对试样进行拉伸性能测试,拉伸速度为 1 mm/min,拉伸试样尺寸见图 2。

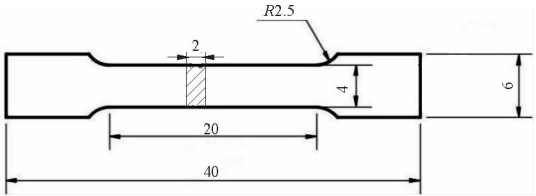


图 2 拉伸试样尺寸
Fig.2 Dimension of tensile specimen

2 试验结果与分析

2.1 合金的凝固组织

图 3 为连续交流磁场下不同电压的 Al-3Fe-0.3Sc-0.1Zr 合金宏观组织。可以看出,当电压为 0 V 时,可以观察到较为粗大的初生 Al₃Fe 相;当电压为 100 V 时,初生 Al₃Fe 相发生了偏聚,部分初生 Al₃Fe 相集中于试样边部,而中心较少;当电压为 200 V 时,初生 Al₃Fe 相偏聚更加明显,绝大部分偏聚于边缘部位,中心几乎

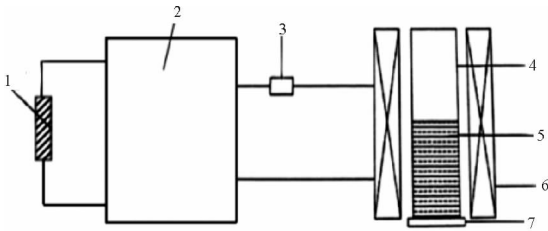


图 1 交流磁场装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of AC magnetic field device
1.交流电源 2.调压器 3.可控开关 4.铸型 5.熔体
6.电磁线圈 7.耐火砖

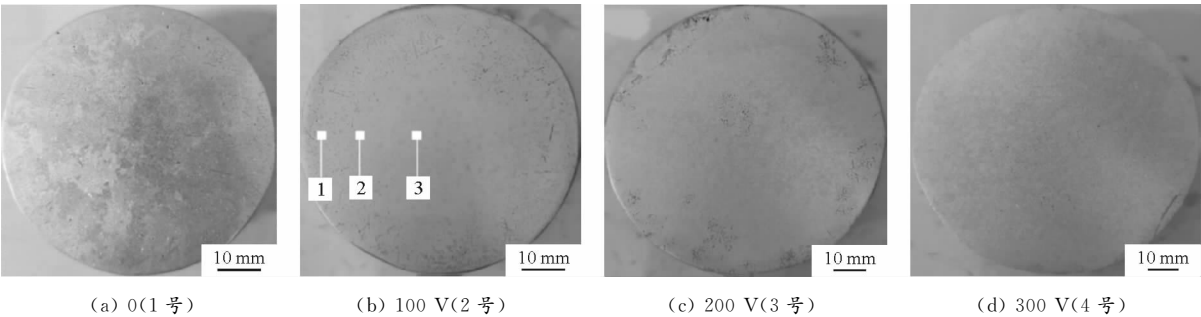


图 3 不同电压下 Al-3Fe-0.3Sc-0.1Zr 合金的宏观形貌

Fig.3 Macro structure of Al-3Fe-0.3Sc-0.1Zr alloy under different voltages

没有 Al_3Fe 相;当电压为 300 V 时,初生 Al_3Fe 相分布较为均匀,且宏观上几乎看不到明显的初生 Al_3Fe 相。

图 4 为连续交流磁场不同电压下合金中的初生 Al_3Fe 相形态。可以看出,经过不同电压处理后,初生 Al_3Fe 相形态变化很大。当电压为 0 时,初生 Al_3Fe 相

呈粗大的长针状;当电压为 100 V 时,初生 Al_3Fe 相出现了很明显的粗化现象,其长度明显增加;当电压为 200 V 时,初生 Al_3Fe 相有所细化,长度有所减小;当电压为 300 V 时,初生 Al_3Fe 相显著细化,变为分布均匀的短棒状。

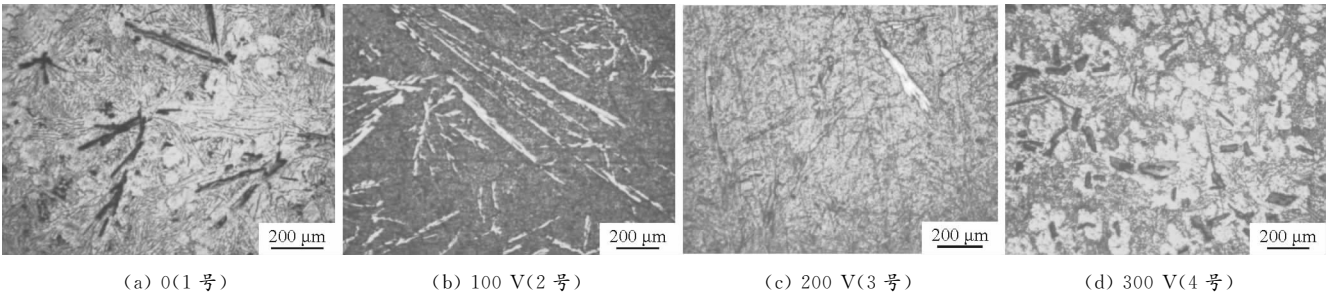


图 4 不同电压下 Al-3Fe-0.3Sc-0.1Zr 合金中初生 Al_3Fe 相形貌

Fig.4 Morphologies of primary Al_3Fe phase in Al-3Fe-0.3Sc-0.1Zr alloy under different voltages

图 5 为 2 号试样边部、过渡区和中心区的微观组织,分别对应图 3b 中 1~3 位置。可以看出,试样边部

的初生 Al_3Fe 相呈粗大的长针状,由于初生 Al_3Fe 相在试样的边部区域大量富集后,在位阻的作用下阻碍初生

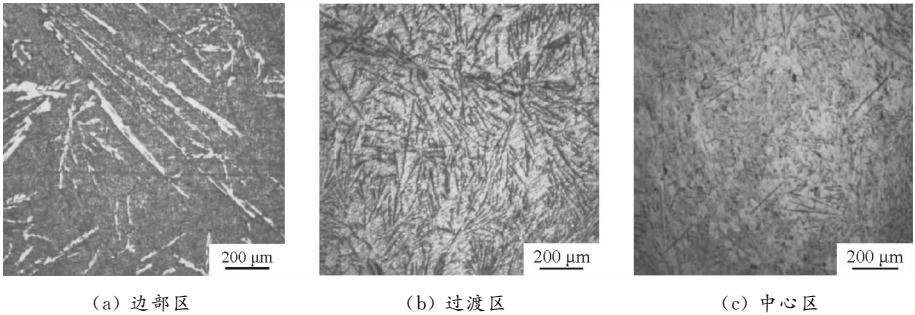


图 5 2 号试样不同位置的微观组织

Fig.5 Microstructure of specimen 2 at different positions

Al_3Fe 相的进一步扩散;过渡区呈现一半区域含有初生 Al_3Fe 相,另一半基本没有初生 Al_3Fe 相;中心区域成分主要为共晶组织,该区域几乎不含初生 Al_3Fe 相。

图 6 为磁场处理前后 1、3 号合金的 X 射线衍射图谱。可以看出,交流磁场处理前后,合金均由 $\alpha\text{-Al}$ 和 Al_3Fe 两种相组成,交流磁场处理后合金中未产生新相。

图 7 为不同的连续交流磁场电压、间断交流磁场放电频率和占空比下 Al-3Fe-0.3Sc-0.1Zr 合金初生 Al_3Fe 相的平均长度。从图 7a 可以看出,在 0~300 V 范围内,

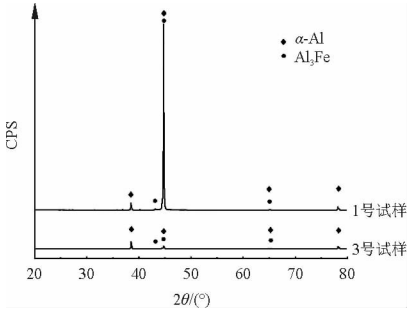


图 6 磁场处理前后 1、3 号合金的 X 射线衍射图谱
Fig.6 X-ray diffraction pattern of the alloy before and after magnetic field treatment

随着磁场电压的增加,初生 Al_3Fe 相平均长度先增加后减小,其转折点在 100 V;当放电频率在 0~10 Hz 内或

占空比在 10%~30% 内,随着放电频率或占空比的增加,初生 Al_3Fe 相的平均长度不断减小。

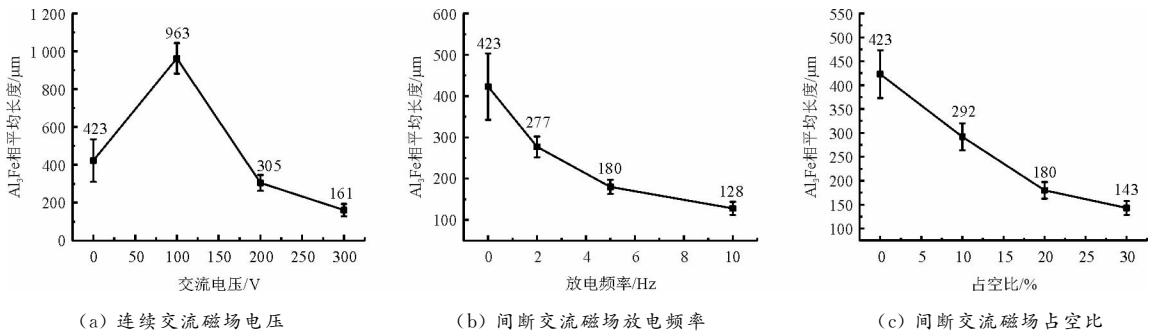


图 7 不同的连续交流磁场电压、间断交流磁场放电频率和占空比下初生 Al_3Fe 相的平均长度

Fig.7 Effect of voltage of continuous AC magnetic field, discharge frequency and duty cycle of discontinuous AC magnetic field on the length of primary Al_3Fe phase of the alloy

2.2 合金的力学性能

图 8 为不同的连续交流磁场电压,间断交流磁场放电频率和占空比下 $\text{Al}-3\text{Fe}-0.3\text{Sc}-0.1\text{Zr}$ 合金的布氏硬度。可以看出,随着磁场电压的增加,布氏硬度先下降后升高,转折点为 100 V;随着放电频率的增加,布氏硬

度不断升高;随着占空比的增加,合金的硬度先升高后有所下降,转折点为 20%。

图 9 为 2 号试样不同部位的布氏硬度。可以看出,试样中心区的硬度高于边部试样的硬度,中心区硬度较边部硬度提高了 26%。

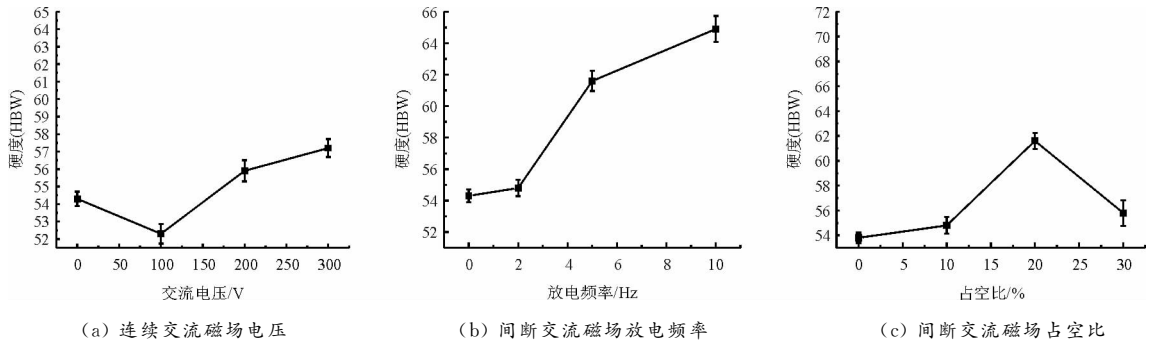


图 8 不同的连续交流磁场电压、间断交流磁场放电频率和占空比对合金布氏硬度的影响

Fig.8 Effect of voltage of continuous AC magnetic field, discharge frequency and duty cycle of discontinuous AC magnetic field on brinell hardness of the alloy

图 10 为未处理、连续交流磁场处理和间断交流磁场处理对 1、4、9 号合金抗拉强度和伸长率的影响。可以看出,连续交流磁场和间断交流磁场处理均可以提高

合金的抗拉强度和伸长率,但间断交流磁场处理合金的抗拉强度和伸长率比连续交流磁场处理后的更高;与未处理合金相比,间断交流磁场处理合金的抗拉强度和伸长率分别提高了 39.1% 和 90.9%。

2.3 分析与讨论

(1) Sc、Zr 对 $\text{Al}-\text{Fe}-\text{Sc}-\text{Zr}$ 合金组织的影响 $\text{Al}-3\text{Fe}$ 合金中加入 Sc 和 Zr 后,会产生 Al_3Sc 和 Al_3Zr 相^[16]。一方面, Al_3Sc 和 Al_3Zr 相为合金的凝固提供大量的异质形核核心,改变了原有的初生 Al_3Fe 相形核生长方式,通过异质形核起到细化初生 Al_3Fe 相的作用;另一方面,由于初生 Al_3Fe 相周围 Sc 和 Zr 的富集,在一定程度上阻碍了 Fe 原子的迁移,增加界面前沿液相中 Fe 的浓度梯度,造成成分过冷,使初生 Al_3Fe 相来不及分枝便被后形核的富 Fe 相所包裹,加之 Fe 原子在铝液中的扩散速度极低,初生 Al_3Fe 相的进一步生长受

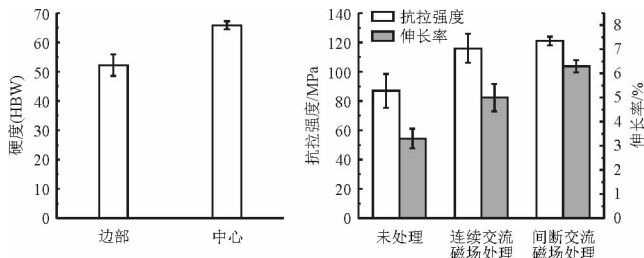


图 9 2 号试样不同部位的布氏硬度

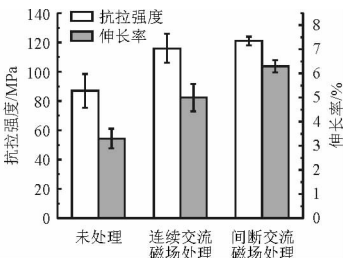


图 10 不同处理工艺对 1、4、9 号合金力学性能的影响

Fig.9 Brinell hardness of specimen 2 in different regions

Fig.10 Effects of different treatment processes on mechanical properties of the alloy 1,4 and 9

到了抑制。

(2)连续交流磁场电压对 Al-Fe-Sc-Zr 合金组织及力学性能的影响 由电磁理论可知,在线圈中通入电流后,熔体会因为交流磁场的作用产生感生电流,它与磁场相互作用会产生洛伦兹力,洛伦兹力 F 与磁感应强度 B 的关系如下^[8]:

$$F = -\frac{B^2}{2\mu} \quad (1)$$

式中, μ 为真空磁导率。

同时由于导电性差异的存在,使得初生 Al_3Fe 相在交流磁场作用下会受到一个指向试样表面的电磁斥力。为了便于对初生 Al_3Fe 相进行受力分析,假设将其看成直径为 d 的球体,则初生 Al_3Fe 相受到的电磁斥力 f 为^[17]:

$$f = \frac{3}{2} \cdot \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2\sigma_1 + \sigma_2} \cdot \frac{\pi d^3}{6} |J_e \times B| \quad (2)$$

式中, d 为初生 Al_3Fe 相的等效球直径; J_e 为脉冲涡流; σ_1 为液态铝的电导率; σ_2 为初生 Al_3Fe 相的电导率。从式(1)和式(2)可以看出,随着磁感应强度增加,交流磁场作用下产生的洛伦兹力和电磁斥力均增大。

一方面,洛伦兹力会对 Al-Fe-Sc-Zr 合金熔体产生电磁搅拌效果,使合金熔体内形成强制对流,增加熔体凝固过程中的过冷度,从而增加了凝固结晶时的形核率;另一方面,洛伦兹力使熔体产生流动,凝固中的初生 Al_3Fe 相将难以继续长大,也会由于流动而被击碎折断,同时对流作用使铸型壁上凝固组织破碎,这些破碎的小颗粒移动到熔体内部成为新的生长核心,从而提高形核率,使初生 Al_3Fe 相得到细化。而对于电磁斥力,合金中初生 Al_3Fe 相会在该力的作用下发生迁移,电磁斥力越大,初生 Al_3Fe 相的迁移作用越强。

未处理时,Al-Fe-Sc-Zr 合金中初生 Al_3Fe 相呈自由生长状态,无晶界等其他元素的影响,因而初生 Al_3Fe 相在基体中呈粗大的长针状分布。当交流电压为 100 V 时,此时磁感应强度较小,故交流电压产生的洛伦兹力也较小,合金熔体产生搅拌和对流作用较小,而初生 Al_3Fe 相所受电磁斥力的影响大于洛伦兹力的影响^[18]。因此,在两个力的综合作用下,初生 Al_3Fe 相将不断迁移到试样的边缘,同时在迁移过程中将会发生碰撞,致使初生 Al_3Fe 相粗化和偏聚。当交流电压为 200 V 时,初生 Al_3Fe 相受到的电磁斥力增大,其迁移和聚合长大的趋势也相应增大,同时洛伦兹力增大使合金熔体的搅拌和对流作用更为剧烈,从而使初生 Al_3Fe 相细化和团聚。当交流电压为 300 V 时,虽然此时产生的电磁斥力很大,但洛伦兹力变化更大,其对初生 Al_3Fe 相的影响远大于电磁斥力的影响,交流磁场产生剧

烈的搅拌和对流作用,使偏聚在一起的初生 Al_3Fe 相一定程度被打散,同时抑制了初生 Al_3Fe 相的自由移动,最终使凝固组织中初生 Al_3Fe 相细化和均匀化。Al-3Fe合金中加入 Sc 和 Zr,同时进行高电压的连续交流磁场处理时,初生 Al_3Fe 相不仅受到交流磁场的电磁搅拌作用,同时还受到 Sc 和 Zr 的变质作用。Sc 和 Zr 对初生 Al_3Fe 相的变质作用为交流磁场下初生 Al_3Fe 相的细化奠定了基础,因此,初生 Al_3Fe 相被进一步细化和均匀化。

未处理时,初生 Al_3Fe 相在基体中呈粗大的长针状分布,严重割裂基体,降低合金的力学性能,因此试样的硬度偏低。当交流电压为 100 V 时,由于初生 Al_3Fe 相在边部区域发生偏聚而粗化,此时试样边部区的布氏硬度最低,同时其中心区域几乎不含有粗大的初生 Al_3Fe 相,故合金中心区的布氏硬度要明显高于边部;当交流电压大于 200 V 时,初生 Al_3Fe 相进一步得到细化,合金的布氏硬度有所提高。

(3)间断交流磁场对 Al-Fe-Sc-Zr 合金组织及力学性能的影响 间断交流磁场对合金熔体具有连续交流磁场的细化晶粒作用,又具有类似于脉冲磁场的电磁振动和电磁搅拌作用。间断交流磁场产生的冲击和振荡作用既加速了型壁处异质形核的振落,并使其散落在熔体内部,又加速了金属熔体在凝固过程中的散热,使得过冷度增加,进一步提高形核率。同时,间断交流磁场是间歇式地产生能量,改变了磁场的累计作用时间,在电磁振动和电磁搅拌作用的同时也降低了能耗,减弱了焦耳热对晶粒生长的不利影响。

间断交流磁场放电频率是指在总能量不变的前提下的放电次数,因此频率改变时,洛伦兹力对合金熔体做功不变,但产生的搅拌效果增强,熔体受到的对流作用增强,从而使合金熔体中传热变得更加均匀,即温度梯度变小,有利于细小的初生 Al_3Fe 相的形成,同时使凝固过程中粗大的初生 Al_3Fe 相被折断,破碎更加充分,故此时初生 Al_3Fe 相得到一定程度的细化。此外,对于柱状试样而言,凝固过程中初生 Al_3Fe 相的固有频率 $f_{\text{固}}$ 可表示为^[19]:

$$f_{\text{固}} = \frac{3.52}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EJ}{m_0}} \quad (3)$$

式中, L 为初生 Al_3Fe 相的本征长度; E 为弹性模量; J 为惯性矩; m_0 为枝晶质量。

当间断交流磁场放电频率在 2~10 Hz 内,随着放电频率增加,一方面在相同时间内,电磁振动的次数逐渐增加,另一方面其频率逐渐接近初生 Al_3Fe 相的固有频率,初生 Al_3Fe 相会因为振动而遭到破坏,从而使初生 Al_3Fe 相破碎成游离晶核,使得合金形核率逐渐提

高,初生 Al_3Fe 相得到细化,长度减小。

随着占空比提高,施加磁场的能量增加,电磁振动和电磁搅拌作用逐渐增强,粗大的初生 Al_3Fe 相不断的被搅断、震碎,合金的形核率提高,初生 Al_3Fe 相被细化;当占空比达到 30% 时,初生 Al_3Fe 相细化效果最好。当占空比继续提高,能量也随之增加,当占空比达到 100% 时,即连续交流磁场,初生 Al_3Fe 相细化效果与占空比为 30% 的间断交流磁场细化效果相当,但能量增加了 70%。因此间断交流磁场相比连续交流磁场大大降低了能耗。

随着放电频率增加,初生 Al_3Fe 相被细化,合金的布氏硬度逐渐升高。在 0~20% 范围内,随着占空比增加,初生 Al_3Fe 相平均长度减小,合金硬度升高;当占空比达到 30% 时,虽然初生 Al_3Fe 相平均长度减小,但是在剧烈的搅拌作用下可能会增加氧化、吸气和夹杂倾向,对合金的力学性能造成不利影响,所以合金的布氏硬度又有所降低。

3 结 论

(1) 连续或间断交流磁场处理可以有效细化 $\text{Al-3Fe-0.3Sc-0.1Zr}$ 合金的组织,其初生 Al_3Fe 相由粗大的长针状变为细小的短棒状,合金的力学性能均有所提高;与未处理的相比,间断交流磁场处理合金的抗拉强度和伸长率分别提高了 39.1% 和 90.9%。

(2) 当交流电压在 0~300 V 内,随着电压增加, $\text{Al-3Fe-0.3Sc-0.1Zr}$ 合金中初生 Al_3Fe 相长度先增大后减小,转折点为 100 V;当连续交流磁场电压为 100 V 时,初生 Al_3Fe 相聚集在试样边部,且试样心部硬度高于试样边部。

(3) 当放电频率在 0~10 Hz 内或占空比在 10%~30% 内,随着放电频率或占空比的增加, $\text{Al-3Fe-0.3Sc-0.1Zr}$ 合金中初生 Al_3Fe 相长度逐渐减小。

(4) $\text{Al-3Fe-0.3Sc-0.1Zr}$ 合金的布氏硬度与初生 Al_3Fe 相的平均长度基本对应。

参 考 文 献

- [1] SASAKITT, OHKUBO T, HONO K. Microstructure and mechanical properties of bulk nanocrystalline Al-Fe alloy processed by mechanical alloying and spark plasma sintering[J]. Acta Materialia, 2009, 57(12): 3 529-3 538.
- [2] GOULART P R, SPINELLI J E, CHEUNG N, et al. The effects of cell spacing and distribution of intermetallic fibers on the mechanical properties of hypoeutectic Al-Fe alloys[J]. Materials Chemistry and Physics, 2009, 119(1): 272-278.
- [3] 梅国宏, 朱立光, 张庆军, 等. 脉冲磁场细晶化技术的研究现状[J]. 铸造技术, 2015, 36(2): 403-406.

- [4] 马修军, 尹健, 周志坚, 等. 脉冲磁场在金属材料制备中的应用研究现状与展望[J]. 铸造技术, 2014, 35(12): 2 763-2 766.
- [5] 王剑, 周榆力. Al-Fe 合金组织优化及相关机制研究进展[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2017, 36(6): 73-82.
- [6] 刘波, 王书生, 高鹤, 等. 半固态成形 Al-Fe 基合金组织与性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2008, 28(S1): 382-385.
- [7] 周振平, 李荣德, 马建超. 热处理对 Al-Fe 合金组织与性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(8): 1 420-1 425.
- [8] 韩逸, 班春燕, 巴启先, 等. 交流磁场对 Al-Fe 合金凝固组织的影响[J]. 东北大学学报, 2006(9): 991-994.
- [9] 陈东风, 曹志强, 张婷, 等. 电磁分离制备过共晶 Al-5Fe 自生表层复合材料[J]. 功能材料, 2007(4): 529-531, 539.
- [10] 李吉祥, 罗大伟, 李廷举, 等. 交变磁场对 7050 铝合金凝固组织的影响[J]. 机械工程材料, 2009, 33(7): 29-33.
- [11] 李宁, 齐敦杰, 黄云, 等. 交流磁场对 $\text{Fe}_{16}\text{Cr}_{2.5}\text{Mo}$ 合金阻尼性能的影响[J]. 金属热处理, 2009, 34(2): 75-77.
- [12] 胡世平, 陈乐平, 周全, 等. 交流磁场对 AZ31 镁合金凝固组织和压缩性能的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47(15): 62-65.
- [13] 王洪新, 程振邦, 宣亮, 等. 交流磁场对 $\text{Mg}_{97}\text{Y}_2\text{Cu}_1$ 合金凝固组织和力学性能的影响[J]. 齐齐哈尔大学学报(自然科学版), 2017, 33(4): 24-28.
- [14] 班春燕, 崔建忠, 巴启先, 等. 交流磁场对 Al-11.4Cu 合金液相线、固相线温度的影响[J]. 材料导报, 2004(5): 95-96, 105.
- [15] 刘艳华, 钱娜, 王龙, 等. 交流磁场对铜/钢异种材料电弧焊接头组织性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2021, 42(7): 179-185.
- [16] 潘海成, 苗进. Sc, Zr 对 Al-4Fe 合金组织的细化作用[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(3): 328-331.
- [17] 王俊, 周全, 吴晗, 等. 脉冲磁场下制备 Al-20Si 功能梯度材料的研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(2): 222-226.
- [18] 吴晗, 周全, 王俊, 等. 磁场和铸造工艺对 $\text{Mg}_2\text{Si}/\text{Al}$ 复合材料中 Mg_2Si 相的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(6): 656-657.
- [19] 谢小华, 周全, 陈乐平, 等. 脉冲磁场-机械振动复合作用下 K4169 高温合金凝固组织的细化[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(12): 3 166-3 172.

(编辑: 栗万仲)

欢迎关注
“特种铸造”
微信公众号



- | | | |
|--------|---------|--------|
| ● 微官网 | ● 行业动态 | ● 联系我们 |
| ● 微商城 | ● 铸造前沿 | ● 免费推广 |
| ● 本刊会议 | ● 经典案例 | ● 铸造职场 |
| ● 收录动态 | ● 铸造学堂 | ● 产品库 |
| ● 稿件系统 | ● 专利与发明 | ● 企业库 |