176 (1993) (1970) 试验研究

体育器材用 TiAl₃/AlSi11Cu3 铝合金组织和 力学性能优化

刘朝猛¹,吴懿姿²

(1. 广西民族师范学院, 广西崇左 532200; 2. 崇左幼儿师范高等专科学校, 广西崇左 532200)

摘要:利用超声振动法制备体育器材用AlSi11Cu3铝合金,通过添加K₂TiF₆粉末原位反应生成 TiAl₃增强相的方法对铝合金进行颗粒增强,研究了超声功率和颗粒增强对AlSi11Cu3铝合金微 观组织和力学性能的影响。试验结果表明,最佳的超声功率为1 kW,超声振动和TiAl₃增强相 的引入能明显细化铝合金组织,大幅提升铝合金的拉伸性能和硬度,抗拉强度、伸长率和硬 度分别提升了33.9%、23.6%和38.8%,断裂特征由准解理断裂逐渐向韧性断裂转变。 关键词:超声振动;体育器材;AlSi11Cu3;力学性能;微观组织

由于国内经济的快速发展,人们对体育锻炼健身等活动的投入越来越多,每年 体育用品的产值不断攀升,行业竞争日益剧烈,对体育器材的要求也越来越高。随 着器材轻量化的推进^[14],铝合金在各行业领域中的用途越来越广泛。但铸造铝合金 的夹杂、气孔等缺陷大大限制了铝合金在体育器材中的大量运用^[5-6]。目前,合金制 备方法包括电磁搅拌法^[7-8]、超声振动法^[9]等多种方法。超声振动法是一种新兴的金 属处理技术,对金属铸件内部的缺陷有着极大的抑制作用,有着良好的晶粒细化、 除气去渣效果^[10-11]。张立华等人^[12]研究了超声波场的引入对7050铝合金凝固组织的影 响,发现超声波对晶粒起到了细化作用。刘宇等人^[13]通过试验和数值模拟分析,共 同验证了超声波对晶粒起到了细化作用。刘宇等人^[13]通过试验和数值模拟分析,共 同验证了超声波对晶粒组化有显著的效果。但在铝合金体育器材的制备中引入超声 振动和颗粒增强方法的相关文献却较少,AlSi11Cu3铝合金体育器材的制备中引入超声 振动和颗粒增强方法的相关文献却较少,AlSi11Cu3铝合金常用来制备小区户外体育 锻炼器材,例如划船器拉伸杆等,对材料的拉伸强度要求较高。本文通过在制备体 育器材用AlSi11Cu3铝合金的过程中施加超声振动原位生成TiAl₃增强相,研究分析了 超声振动和颗粒增强对AlSi11Cu3合金微观组织、拉伸性能和硬度的影响,并探讨了 超声振动对铝合金的作用机理,旨在提升铸造体育用铝合金的性能,加大其在体育 器材领域的应用范围。

1 试验材料和方法

体育器材用铝合金试样的化学成分如表1所示,用如图1所示的超声熔炼设备, K₂TiF₆粉末在250 ℃到300 ℃的温度下烘烤2~3 h去除水分,用以制备TiAl₃含量为8% 的TiAl₃/AlSi11Cu3铝合金。用热电偶测量温度,对铝合金在680 ℃温度下进行熔化并 保温半小时,降低温度至610 ℃进行超声处理,在超声振动施加前,将超声变幅杆伸 入炉内预热5~10 min至相同温度,再将变幅杆伸入铝合金熔体内施加超声振动,超 声振动时间为90 s,超声振动频率为20 kHz,超声功率分别为100 W、400 W、700 W、 1 000 W。

对超声处理后的铝合金熔体进行除气、扒渣、浇注、冷却,取试样镶嵌制成 金相试样,砂纸打磨并进行抛光后,用体积分数为0.5%的HF溶液进行腐蚀,使用 OLYMPUS PMG-3光学显微镜(OM)、自带能谱分析(EDS)的扫描电子显微镜 (SEM)和X射线衍射仪(XRD)观察金相微观组织和分析物相组成,用数字图像

作者简介: 刘朝猛(1982-),男, 土家族,硕士研究生, 副教授,研究方向为少 数民族传统体育文化研 究。E-mail:1701669568@ qq.com 通讯作者: 吴懿姿,女,本科,讲师。 E-mail:wzy1213@yeah.net

中图分类号:TG146.21 文献标识码:A 文章编号:1001-4977(2022) 02-0176-06

基金项目:

广西民族师范学院2020 年重点学科建设体育学 阶段性成果;2018年教 育部人文社科一般项目 (8YJC890063) 收稿日期: 2021-03-10收到初稿, 2021-06-02收到修订稿。



表1 体目循初用指言並化学成方 Table 1 Chemical composition of the aluminum alloy for the sports equipment								$w_{\rm B}/\%$						
Si	Cu	Mg	Fe	Mn	Zn	Ni	Pb	Sn	Al					
11	3	≤0.3	0.3~0.6	0.3~0.5	0.6~0.9	≤0.5	≤0.1	≤0.1	余量					

体查坚持田纪合会化当式公

分析仪系统(Imageproplus6.0)分析晶粒大小变化。将 熔体浇注成如图2所示的拉伸试样,在UTM5150型拉伸 试验机上测试拉伸强度和伸长率,并用QUANTA-200 型扫描电子显微镜(SEM)观测拉伸试样断口形貌。 用HXD-2000TMJC/LCD型维氏硬度计测试硬度,施加 压力为0.2 kg,施压时间为15 s。铝合金的孔隙率 θ 采用 阿基米德法进行测试,根据公式(1)计算得出:

$$\theta = 1 - \frac{m_2 - m_1}{\rho \times V} \tag{1}$$

式中: m_2 和 m_1 分别是试样在空气中和在水中的质量, ρ 是试样的密度,V是试样的体积。



1. 冷却水箱及管道 2. 超声波发生器 3. 温控器 4. 热电偶 5. 超声波换能器 6. 升降杆 7. 超声变幅杆 8. 电阻炉 9. 支承盘 图1 超声设备示意图





图2 铝合金拉伸试样示意图 Fig. 2 Schematic diagram of the aluminum alloy tensile specimen

2 试验结果与分析

2.1 微观组织

图3是AlSi11Cu3铝合金和TiAl₃/AlSi11Cu3铝合金 的XRD分析图,从图中可以发现,除了Al峰、Si峰、 CuAl₂峰之外,还有TiAl₃峰,由此证明,有TiAl₃增强相 的生成。根据之前的文献研究^[14],在熔体内 K_2 TiF₆与Al 发生原位反应,生成TiAl。增强颗粒。

图4是TiAl₃/AlSi11Cu3铝合金的SEM和EDS图, 超声振动后TiAl₄/AlSi11Cu3铝合金的扫描电镜如图4a 所示。可以看到,有小块状TiAl₃颗粒均匀分布在基体 中,平均尺寸约为4 µm。如图4b所示,超声前TiAl₃/ AlSi11Cu3铝合金中, TiAl。颗粒呈现大块状, 平均尺 寸为10 um, 日发生较明显的闭聚现象。图4c中箭头的 EDS能谱分析结果表明,颗粒成分为Al和Ti,根据EDS 能谱分析和表2中Al和Ti的原子百分比,可进一步确定 原位合成的增强相是TiAl₃。



图3 铝合金的XRD分析图 Fig. 3 XRD patterns of the TiAl₃/AlSi11Cu3 alloy and AlSi11Cu3 alloy



(a) 超声



1. /0/

图5显示了基体和引入超声振动和TiAl。增强相的 AlSi11Cu3铝合金微观组织,从图中可以明显看出, 超声后的铝合金微观组织更加细小, α-Al晶粒尺寸更 小。白色颗粒是 α -Al相,深黑色是Si相。在图5a中, α -Al相颗粒轮廓不清楚, α -Al的晶粒尺寸较大, Si 相呈现为长条状。图5b中颗粒轮廓变得清晰, α-Al出 现了明显的晶界,颗粒被明显细化,Si相变成细小的 短棒状和颗粒状,说明超声振动能细化晶粒。Si相的 平均颗粒尺寸和长径比由17.5 μm和6.4减小到6.8 μm和 2.6。在这一阶段,由于高能超声的作用,空化效应和 声流效应变得明显,破碎了粗大晶粒,导致形核速率 的增加,从而细化晶粒。图6对基体和超声振动TiAl₄/ AlSi11Cu3铝合金微观组织中Si相晶粒尺寸和Si相长径 比进行了定量分析。结果表明,施加适当的超声振动 可以将块状或条状以及长针状Si相破碎成短棒状和颗 粒状。孔隙率由未超声的0.30%降低到超声处理后的 0.23%, 合金组织更加致密。进一步验证了超声振动对 合金组织起到了细化作用。TiAl₃增强相的引入,抑制 了α-Al晶粒的生长,使得α-Al晶粒尺寸变小,这进一 步细化了铝合金的微观组织。

为研究超声功率对体育器材用TiAl₃/AlSi11Cu3铝

合金的影响,分别在100 W、400 W、700 W、1 kW下 对TiAl₃/AlSi11Cu3铝合金进行了超声振动,图7是各超 声功率下的微观组织图。当超声功率为100 W时,可明 显看出,α-Al相晶界不太明显,Si相呈现为长针状, 可能是由于超声功率太小,超声振动对微观组织的影 响不明显,所以其形貌较差。当增大超声功率至400 W 时,超声振动对铝合金微观组织的影响加强,可看到 明显的α-Al晶粒和破碎的Si相。继续增大功率至700 W, α-Al晶粒尺寸减小,超声振动的效果更显著。当超声 功率达到1 kW时,α-Al晶粒变化较小,超声振动完全 破碎了Si相,使其均匀地分布在晶界处,当施加足够大 的超声振动功率(700 W、1 kW)时,超声振动的效果 最为明显,可以完全破碎枝晶,分散熔体中的颗粒, 微观组织较均匀致密,颗粒尺寸和形貌较好。

表2 图4中箭头1和2的化学成分 Table 2 Chemical compositions of the arrow1

	anu arrow 2 m rig. 4			
元素	Ti	Si	Al	
点1	22.11	12.19	63.88	
点2	23.76	11.06	55.27	



图5 合金的微观组织 Fig. 5 Microstructures of the alloys

2.2 拉伸性能

图 8 是基体和超声温度为610 ℃下TiAl₃增强 AlSi11Cu3铝合金的拉伸性能测试结果。可以看出,引 入超声振动和TiAl₃增强相的AlSi11Cu3铝合金拉伸试样 比基体的抗拉强度和伸长率有了显著的提高,铝合金 的抗拉强度从180.4 MPa增大到241.6 MPa,伸长率从 2.41%增大到2.98%,分别提高了33.9%和23.6%。证明 了超声振动能提高体育器材用铝合金的拉伸性能。

从图9合金的室温下拉伸断口SEM形貌可以发现, 基体拉伸形貌如图9a所示,铝合金拉伸断口韧窝较 少,而且较浅,断裂面比较平坦,这大大影响了材料 的塑性,断裂方式为解理断裂为主。图9b中,对铝合





图7 不同超声功率下的TiAl₃/AlSi11Cu3铝合金微观组织 Fig. 7 Microstructure of TiAl₃/AlSi11Cu3 with different ultrasonic power

金进行超声振动和颗粒增强后,拉伸断口的韧窝数量 变多,且变小变深,断裂特征由准解理断裂逐渐向韧 性断裂转变,展现出良好的拉伸性能,符合拉伸试验 测试结果。更加验证了超声振动和颗粒增强能提升体 育器材用铝合金的拉伸性能。

2.3 硬度

对比基体和超声温度为610 ℃下TiAl₃增强 AlSi11Cu3铝合金的硬度,超声振动后,铝合金的硬 度由未超声处理的HV 86.8提高到了HV 120.5,提高了 38.8%。由此可知,超声振动能提高铝合金的硬度。超





图9 铝合金拉伸断口SEM形貌 Fig. 9 SEM morphologies of the tensile fracture surfaces of the aluminum alloys

179

试验研究

(3)

声振动处理后,铝合金的组织细小均匀和TiAl₃增强相的生成进一步提升了铝合金的硬度。

3 讨论

Al-Si合金在铸造过程中会产生气孔、夹杂等缺陷,缺陷过多会影响到材料的力学性能,对体育器材用铝合金有着极大的危害。在超声振动和颗粒增强的作用下,铝合金晶粒尺寸、形貌和晶粒分散性得到改善,显微组织得到了明显细化,这是由于在铝合金熔体中原位生成了TiAl₃增强颗粒,且超声振动后发生空化效应和声流效应。

空化效应是超声波在熔体中产生微气泡,微气泡 膨胀、破裂导致局部温度和压力升高的一系列动态过 程。根据公式(2)和(3):

$$P_{\max} = P_{V} \left[\frac{P_{m}(\gamma - 1)}{P_{V}} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$
(2)

$$T_{\max} = T_{\min} \left[\frac{P_{\max}(\gamma - 1)}{P_{y}} \right]$$
 (3)

式中: P_v 是空化泡初始半径的压力,可近似为0.1 MPa。 P_m 为声压振幅与静压之和,试验设备提供的声压振 幅数为3.19 MPa,因此 P_m =3.29 MPa。 γ 是气泡中 气体的比热比,等于1.4。假设不存在强超声衰减, P_{max} =826.79 MPa。根据方程式(2), T_{min} 是熔体的 加热温度,在超声温度为610 °C。由公式2可计算出 T_{max} =8.03 × 10³ °C。由于超声波空化的影响,熔体中产 生103 °C的局部瞬态高温和高压。在高温下颗粒被空化 效应产生的高压冲击波分散,细化并均匀分布在基体 中,超声空化产生的高压冲击波会破碎枝晶以及长针 状和块状硅相^[15],这将抑制晶粒长大,细化铝合金微 观结构。

声流效应在铝合金熔体内产生声压梯度,进而产 生环流现象,使晶粒均匀分布在铝合金熔体内。最大

流速可根据公式(3)得出:

 $V=\sqrt{2}\pi fA$

式中:f是超声的振动频率,等于20 kHz,A是超声变幅 杆的最大振幅,为30 µm,经计算V=2.67 m/s,超声波 在熔体中产生的声流可以以很快的速度运动。声流造 成了环流现象,熔体中产生的小漩涡可以使被打碎的 颗粒在循环中滚动,从而使颗粒细化并均匀分布。

原位反应生成的TiAl₃新相与Al晶格结构相容, TiAl₃新相晶面与Al基体晶面的晶格错配度为0.05,具有 一定的共格特性,且TiAl₃新相优先生长,抑制了α-Al 的生长,起到了异质形核的作用,对基体晶粒细化起 到了重要作用。综上,这就是超声振动能使铝合金晶 粒细化、组织均匀,拉伸性能和硬度提高的原因。

4 结论

(1)加入 K_2 TiF₆并超声振动后, α -Al相由原来轮 廓不清粗大,变成了细晶,Si相由块状或条状以及长针 状变为短棒状和颗粒状,Si相平均颗粒尺寸和长径比分 別由17.5 μ m和6.4减小到6.8 μ m和2.6,且铝合金孔隙率 也出现下降,TiAl₃增强相的尺寸由未超声的10 μ m减小 到4 μ m,团聚现象消失,证明超声振动明显细化了铝 合金组织,最佳的超声振动功率为1 kW。

(2)超声振动后,TiAl₃/AlSi11Cu3铝合金的抗拉 强度和伸长率由基体的180.4 MPa和2.41%增大到241.6 MPa 和2.98%,分别提高了33.9%和23.6%,硬度由HV86.8 提高到了HV120.5,提高了38.8%。拉伸断口韧窝变多 变小变深,断裂特征由准解理断裂逐渐向韧性断裂转 变。

(3)超声波在铝合金熔体内发生空化效应和声流 效应,打碎了枝晶,并使晶粒均匀分布,使得铝合金 组织细化。

参考文献:

- [1] 苏俊飞. Mg-Li-Y-Zn合金的制备及其组织性能研究[D].重庆:重庆大学,2018.
- [2] 智永红. 体育器材用铝基复合材料的制备与性能研究 [J]. 热加工工艺, 2015, 44(10): 142-144.
- [3] 耿其东,李春燕,洪捐. 超声冲击对7075铝合金残余应力及微观组织的影响 [J]. 科学技术与工程,2020,20(8):3017-3023.
- [4] 张殿杰,刘建芳,王星,等.轻量化枝杈轮辐铝合金轮毂低压铸造成形有限元模拟及试验分析 [J].铸造,2020,69(10):1098-1103.
- [5] 李成,严青松,芦刚,等.超声功率对金属型铸造铝合金二次枝晶间距的影响 [J].特种铸造及有色合金,2015,35(1):103-105.
- [6] 潘飞,芦刚,严青松,等. 超声施振温度对A357合金二次枝晶臂间距的影响 [J]. 铸造,2016,65(1):76–79.
- [7] 陈志平,刘政,陈涛.电磁搅拌半固态铝合金磁感应强度的优化 [J].铸造,2017,66(12):1287-1293.
- [8] 张晨阳,赵升吨,王永飞.电磁搅拌法制备的半固态2A50合金的显微组织演变 [J].中国有色金属学报,2015,25(7):1781-1789.
- [9] SUN Yonghui, YAN Hong, XIONG Junjie. Al₃Ti/ADC12 composite synthesized by ultrasonic chemistry in situ reaction [J]. Science and Engineering of Composite Materials, 2020, 27 (1): 10–18.
- [10] 戴光星,程和法,黄笑梅,等.AlSi7Mg合金等温处理中组织形态的演变[J].特种铸造及有色合金,2006,26(4):220-222.

- [11] 冯伟骏,谭家荣,李喜孟,等. 功率超声对Pb-Sn合金凝固行为的影响 [J]. 铸造,2004(5): 376–378.
- [12] 张立华,张晓明. 超声功率对半连续铸造7050铝合金晶粒细化的影响 [J]. 机械工程材料, 2009 (9): 54-56.
- [13] 刘宇,魏作辉,刘淑娟,等.不同超声功率下半连续铸造7050铝合金凝固组织的实验与模拟研究 [J].铸造技术,2015,36(10): 2513–2515.

试验研究

- [14] LIU Z W, WANG X M, HAN Q Y, et al. Effects of the addition of Ti powders on the microstructure and mechanical properties of A356 alloy [J]. Powder Technology, 2014, 253: 751–6.
- [15] WANG F, TZANAKIS I, ESKIN D, et al. In situ observation of ultrasonic cavitation-induced fragmentation of the primary crystals formed in Al alloys [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 39: 66.

Optimization of Microstructure and Mechanical Properties of TiAl₃/AlSi11Cu3 Alloy for Sports Equipment

LIU Chao-meng¹, WU Yi-zi²

(1. Guangxi Normal University for Nationalities, Chongzuo 532200, Guangxi, China; 2. Chongzuo College for Preschool Education, Chongzuo 532200, Guangxi, China)

Abstract:

AlSi11Cu3 aluminum alloy for sports equipment was prepared via ultrasonic vibration. The aluminum alloy was reinforced by adding $K_2 TiF_6$ powder through in-situ reaction to form TiAl₃ reinforced phase. The effects of ultrasonic power and particle reinforcement on microstructure and mechanical properties of the AlSi11Cu3 aluminum alloy were studied. The results showed that the optimum ultrasonic power was 1 kW. Ultrasonic vibration and the TiAl₃ reinforcement phase obviously refined the microstructure of the aluminum alloy, and greatly improved the tensile properties and hardness of the aluminum alloy. The tensile strength, elongation and hardness increased by 33.9% 23.6% and 38.8%, respectively. The fracture characteristics changed from quasi cleavage fracture to ductile fracture.

Key words:

ultrasonic vibration; sports equipment; AlSi11Cu3; mechanical properties; microstructure