

# 超声振动制备半固态体育器材用铝合金组织及其拉伸性能研究

卢川<sup>1</sup>, 刘朝猛<sup>2</sup>

(1. 广西警察学院警察体育教研部, 广西南宁 530000; 2. 广西民族师范学院体育学院, 广西崇左 532200)

**摘要:** 采用超声振动法制备了半固态体育器材用铝合金浆料, 研究了超声振动及超声温度对铝合金的微观组织、抗拉强度、伸长率和硬度的影响。试验结果表明, 超声振动能明显细化半固态铝合金浆料的组织, 初生  $\alpha$ -Al 颗粒更小更圆整; 铝合金抗拉强度提高了25.3%, 伸长率提高了69.4%, 硬度提高了11.4%。随着超声温度下降, 初生  $\alpha$ -Al 颗粒尺寸增大, 形状系数先增大再减小。超声对体育器材用铝合金的细化是超声产生的空化效应和声流效应的作用。

**关键词:** 超声振动; 体育器材; 铝合金; 超声温度; 拉伸性能

由于体育器材在现代社会中的广泛使用, 其轻量化进程也在不断加快, 铝合金凭借其密度小、耐腐蚀、良好的力学性能、易加工等特点, 在体育器材领域得到广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。铝合金在实际应用中常用作体育器材用零件, 但由于铸态铝合金通常在铸造时会产生气孔、夹杂等缺陷导致其性能不佳, 大大限制了在体育器材领域的应用。然而超声振动法<sup>[4-6]</sup>制备半固态铸造铝合金在改善铸态合金组织方面起到了极大的作用, 使颗粒更细, 组织更均匀。V. O. Abramov等<sup>[7]</sup>通过实验揭示了在超声处理Al-Si合金之后, 硅板大部分被破碎, 形成球化结晶, 最终增强了合金的可塑性和强度, 使得Al-Si合金在半固态领域有着极大的优势。程和法等<sup>[8]</sup>采用超声处理Al-20%Si合金研究其对合金微观组织形貌的影响, 结果发现当超声功率越大, 超声时间越长, 合金的初晶硅形貌从粗大的板片状逐渐变成细小的球状颗粒, 超声最佳温度为660 °C, 此时初晶硅尺寸细小、圆整度高且分布均匀。冯丹艳<sup>[9]</sup>利用超声振动制备了ZL101铝合金, 发现超声振动有良好的除气效果, 凝固组织中的针孔分布明显改善, 晶粒尺寸明显减小, 生成了细小的等轴晶组织。但是, 对于超声振动法制备半固态体育器材用铝合金的微观组织及其性能方面的研究却较少。因此, 本文在不同超声温度下对半固态体育器材用铝合金施加超声振动, 研究分析了超声及超声温度对其微观组织、拉伸性能和硬度的影响。此外, 对超声振动的作用机理也进行了讨论。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

本研究采用的试验材料是A356铝合金, 熔点是615 °C, 化学成分包括7%的Si和0.35%的Mg, 其余杂质含量总和<1.5%, 余量为铝。铝合金体育器材零件如图1所示, 其尺寸为 $\Phi 25$  mm, 壁厚8 mm。

### 1.2 试验方法

本试验采用的超声设备示意图如图2所示, 超声设备主要包括超声波发生器、超声波换能器、变幅杆等组成。先将A356铝合金在740 °C下加热至熔融状并保温10 min, 在进行超声前超声变幅杆须预热至超声温度同一温度值, 用热电偶测量温度,

#### 作者简介:

卢川(1972-), 男, 在职研究生, 副教授, 主要从事警察体育、社会体育等研究工作。

#### 通讯作者:

刘朝猛, 男, 硕士研究生, 副教授。E-mail: cr\_jb19@126.com

中图分类号: TG146.2+1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2021)04-0449-05

#### 基金项目:

2018年广西哲学社会科学规划研究课题(18BTY003)

#### 收稿日期:

2020-09-15 收到初稿,

2020-11-04 收到修订稿。

然后降温至在不同的温度（615 ℃、605 ℃、595 ℃、585 ℃）下，半固态铝合金降温速率为10 ℃/min，将超声变幅杆伸入熔体进行超声振动90 s，超声功率为800 W，超声设备的频率为20 kHz。用直径为0.8 mm的石英吸管快速吸取半固态铝合金，并用水冷却、镶嵌制备金相试样，用200目、600目、800目、1 200目、1 500目和2 000目的砂纸打磨，并抛光制成金相试样，用0.5% HF溶液腐蚀5 s，并用无水乙醇清洗，吹干，用光学显微镜（Eclipse MA200, Nikon Metrology, Inc., Brighton, UK）观察其微观组织，利用数字图像分析系统（Imageproplus6.0）对样品的显微照片进行分析。由于颗粒的形状是不规则的，颗粒的平均直径被定义为颗粒的晶粒尺寸。本研究中初生 $\alpha$ -Al颗粒的晶粒尺寸（ $R$ ）和形状系数（ $S_f$ ）可用公式（1）和公式（2）定义：

$$R = 2\sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad (1)$$

$$S_f = 2\sqrt{\frac{4\pi S}{D^2}} \quad (2)$$

式中： $S$ 为待测颗粒的面积， $D$ 为待测颗粒的周长。将超声振动制备好的半固态铝合金浆料除气扒渣后浇注到模具中，制备如图3所示的铝合金金属型标准拉伸试样，并对浇注的试样进行性能测试。要得到最后的体育器材零件，须对半固态铝合金浆料在零件模具内进行浇注成形，抛光打磨、镗孔等工艺步骤。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 超声振动对半固态 A356 铝合金微观组织的影响

图4是未超声和超声后A356铝合金半固态微观组织图。从图4a中可明显看出，初生 $\alpha$ -Al颗粒大部分呈现为粗大的树枝晶，初生 $\alpha$ -Al颗粒的晶粒尺寸约为230  $\mu\text{m}$ 。而在615 ℃下对铝合金施加800 W的超声功率进行超声振动90 s时，初生 $\alpha$ -Al颗粒的形貌发生显著的变化，呈现为近球状，如图4b所示，初生 $\alpha$ -Al颗粒的晶粒尺寸约为90  $\mu\text{m}$ 。这证明了超声振动对铝合金的微观组织有细化作用，使得初生 $\alpha$ -Al颗粒更加圆整、细小。

利用数字图像分析仪系统（Imageproplus6.0），图5较为直观地量化显示出了初生 $\alpha$ -Al相在超声前后的尺寸及形貌的变化差异。当未施加超声时，初生 $\alpha$ -Al相的晶粒尺寸粗大，形状系数较低；施加超声后，初生 $\alpha$ -Al相的晶粒尺寸明显减小，形状系数较高。由此说明，施加超声可以使A356铝合金半固态浆料的微观组织更细小、初生 $\alpha$ -Al相形貌更圆整。

### 2.2 超声温度对半固态 A356 铝合金微观组织的影响

在不同超声温度下，半固态A356铝合金微观组织如

图6所示，此时的超声功率为800 W，超声时间为90 s。从图6a中可以看出当超声温度为615 ℃时，半固态浆料中生成的初生 $\alpha$ -Al颗粒较为细小，形貌圆整。当超声温度为605 ℃时，半固态A356铝合金微观组织如图6b所示，初生 $\alpha$ -Al颗粒晶粒尺寸 $R$ 较小，形貌呈现为球状。如图6c所示，当超声温度为595 ℃时，初生 $\alpha$ -Al颗粒主要表现为接近球状，晶粒尺寸 $R$ 变大。当超声温度为585 ℃时，初生 $\alpha$ -Al颗粒在图6d中呈现为蔷薇状，圆整度大幅下降，形貌发生显著变化，晶粒尺寸 $R$ 也明显大幅增大。

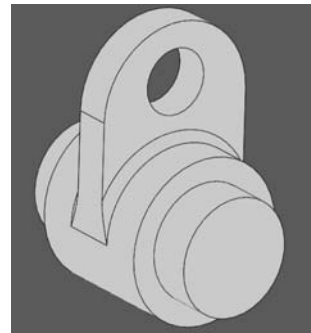
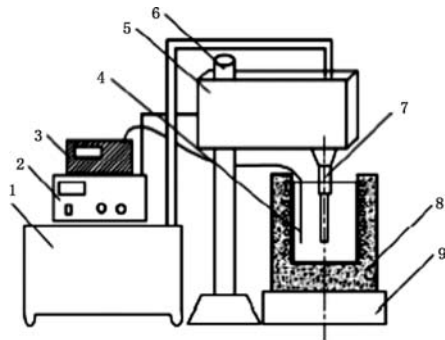


图1 体育器材零件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sports equipment parts



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. 超声波变幅杆
8. 电阻炉 9. 支承盘

图2 超声设备示意图

Fig. 2 Schematic diagram of ultrasonic device

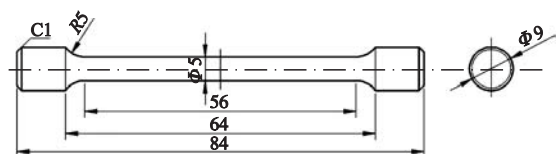
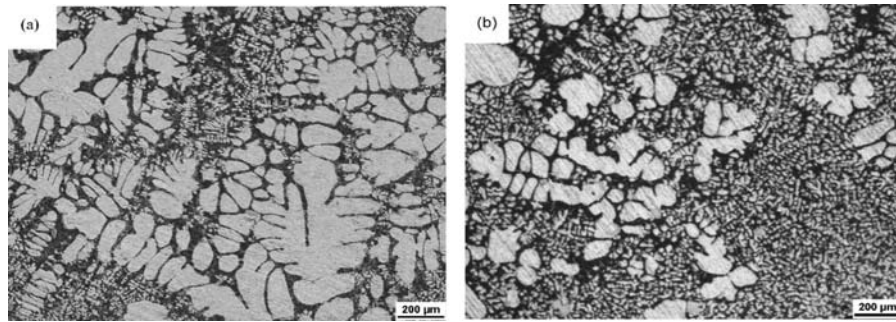


图3 拉伸试样图

Fig. 3 Tensile specimen geometry



(a) 超声前

(b) 超声后

图4 半固态铝合金微观组织

Fig. 4 Microstructure of semi-solid aluminum alloy

图7给出了半固态A356铝合金微观组织的初生 $\alpha$ -Al相在不同温度下晶粒尺寸及形貌变化。随着超声温度的不断下降,初生 $\alpha$ -Al颗粒的晶粒尺寸逐渐增大,而形状系数先增大后减小。其中,在超声温度为605 $^{\circ}\text{C}$ 时,晶粒尺寸较小,形状系数最大达到0.73。颗粒的形状系数越大代表颗粒越圆整。因此说明,当超声温度为605 $^{\circ}\text{C}$ 时,施加超声振动后的半固态铝合金浆料的微观组织更好,形貌更圆整,尺寸较细小。

## 2.3 超声振动对半固态 A356 铝合金性能的影响

### 2.3.1 超声振动对半固态铝合金拉伸性能的影响

各温度下半固态铝合金的超声后和未进行超声拉伸试样的拉伸强度的对比如图8所示。从图中可明显地看出,随着温度的下降,拉伸强度不断减小;同一温度下,超声后的拉伸试样的拉伸强度明显大于未超声的试样的拉伸强度。未进行超声振动的铝合金拉伸试样的平均抗拉强度为151 MPa,而经过超声振动处理后的铝合金拉伸试样的平均抗拉强度为190 MPa,抗拉强度提升了25.3%。这主要是超声振动细化了铝合金组织,超声振动显著地提升了铝合金的抗拉强度。

超声前后半固态铝合金伸长率的变化如图9所示。在超声前,铝合金的平均伸长率约为4.8%;超声振动后,铝合金的平均伸长率增大到8.3%,提高了69.4%。超声振动大幅提升了半固态铝合金的塑性。

### 2.3.2 超声振动对半固态铝合金硬度的影响

图10是半固态铝合金的超声前后硬度变化对比图。在进行超声处理后,半固态铝合金试样的平均硬度为HBS63.3,相比于未进行超声处理的铝合金试样平均硬度(HBS56.8)提高了11.4%。超声振动可大幅提高铝合金的硬度。

## 2.4 超声机理

从现有的研究得知,超声振动能细化半固态铝合金的组织,这主要是由于超声振动在半固态铝合金中

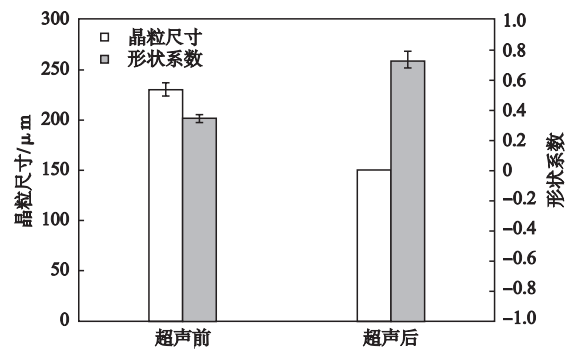
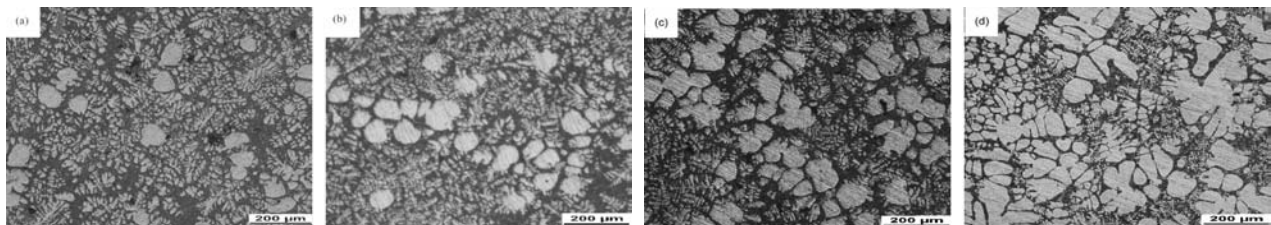
图5 超声前后初生 $\alpha$ -Al相晶粒尺寸和形状系数Fig. 5 Grain size and shape coefficient of primary  $\alpha$ -Al phase before and after ultrasonic treatment(a) 615 $^{\circ}\text{C}$ (b) 605 $^{\circ}\text{C}$ (c) 595 $^{\circ}\text{C}$ (d) 585 $^{\circ}\text{C}$ 

图6 不同超声温度下半固态铝合金微观组织

Fig. 6 Microstructure of semi-solid aluminum alloy at different ultrasonic temperatures

引发的空化效应和声流效应的作用<sup>[10]</sup>。空化效应是指超声波在金属熔体中的振动，导致大量微气泡和空穴的产生，微气泡在金属熔体中产生、生长、破裂等一系列动力学过程。声流效应指的是超声波在金属熔体中传播时，受到熔体的阻碍而在其传播方向上呈现一定声压梯度，进而在金属熔体内产生环流。超声振动对体育器材用半固态铝合金的细化作用主要是空化效应增加形核率和超声对枝晶的破碎作用。

空化效应要在一定的超声功率下才能产生，超声产生的声压足够大，会在金属熔体内产生空化气泡，这些气泡在长大、膨胀的过程中会吸收周围的能量，使气泡周围产生局部过冷，气泡就成为了形核的核心，促进了形核。空化气泡的形核最小半径与声压之间的关系<sup>[11]</sup>是：

$$R_{\min}^3 + \frac{2\sigma}{P_0} R_{\min}^2 - \frac{32\sigma^3}{27(P_m - P_0)} = 0 \quad (3)$$

式中： $R_{\min}$ 为空化气泡的最小半径， $\sigma$ 为铝合金熔体的表面张力， $P_m$ 为声压幅值， $P_0$ 为大气压力，其中 $\sigma$ 、 $P_0$ 可认为常数， $P_m$ 是由超声功率决定的，超声功率 $P$ 越大，声压幅值 $P_m$ 就越大。从式(3)中的数学关系中我们可知，当声压幅值 $P_m$ 越大时，空化气泡的最小半径 $R_{\min}$ 就越小，空化效应能产生的空化气泡就越多，熔体的形核率就越大。

超声细化作用的机理如图11所示。当空化气泡膨胀到一定程度，就会破裂，在熔体内产生瞬时的高温高压，形成强烈的冲击波，巨大的冲击波和声流效应共同对枝晶产生巨大的破坏，使枝晶从主干上脱落，对颗粒产生细化作用。除此之外，声流效应形成的环流会使颗粒均匀地分布在熔体当中。因而超声振动会使半固态浆料的组织更加均匀细小，颗粒更圆整。

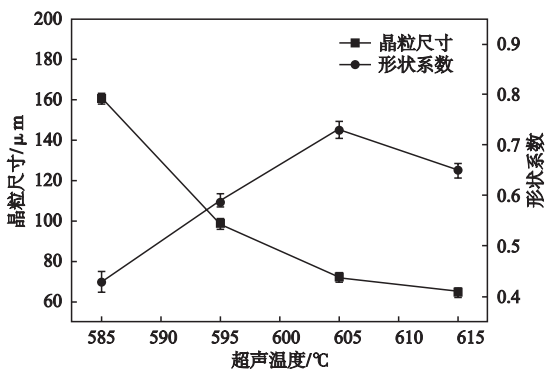


图7 不同超声温度下初生 $\alpha$ -Al相晶粒尺寸和形状系数  
Fig. 7 Grain size and shape coefficient of primary  $\alpha$ -Al phase at different ultrasonic temperatures

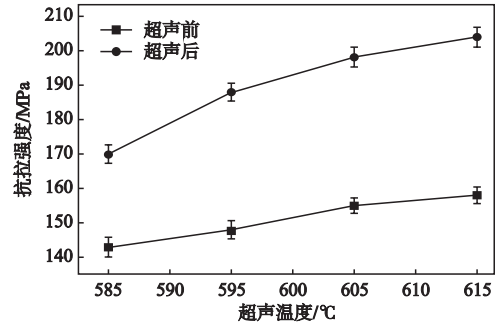


图8 超声前后半固态铝合金的抗拉强度变化  
Fig. 8 Tensile strength changes of semi-solid aluminum alloy before and after ultrasonic treatment

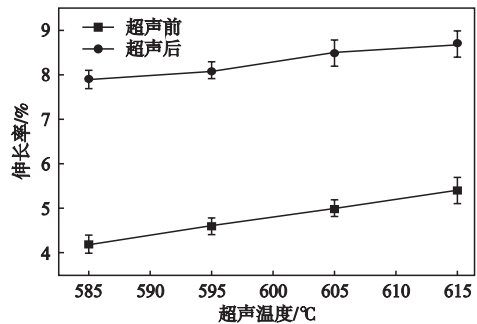


图9 超声前后半固态铝合金的伸长率变化  
Fig. 9 Elongation changes of semi-solid aluminum alloy before and after ultrasonic treatment

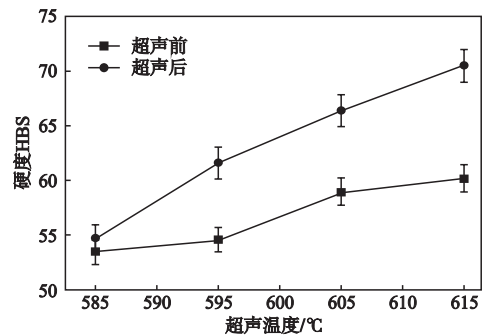


图10 半固态铝合金的超声前后硬度变化对比  
Fig. 10 Comparison of hardness changes of semi-solid aluminum alloy before and after ultrasonic treatment

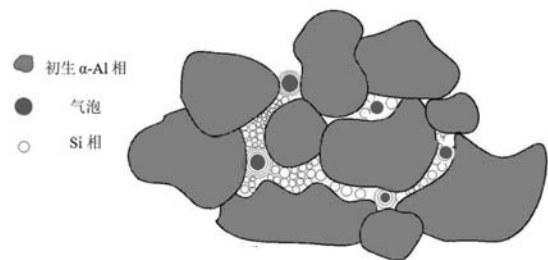


图11 超声作用机理示意图  
Fig. 11 Schematic diagram of ultrasonic mechanism

### 3 结论

(1) 施加超声振动后, 半固态铝合金浆料组织中的初生  $\alpha$ -Al 颗粒形貌较好, 晶粒尺寸为  $90 \mu\text{m}$ , 形状系数为 0.73。超声振动对体育器材用半固态铝合金浆料的组织起到了明显的细化作用。

(2) 在超声温度为  $605 \text{ }^\circ\text{C}$  下, 对铝合金施加 800 W 的超声振动 90 s 时, 制备的半固态铝合金浆料组织较好, 初生  $\alpha$ -Al 颗粒的晶粒尺寸为  $72.4 \mu\text{m}$ , 形状系数为 0.73。当超声温度降低时, 颗粒尺寸增大, 形状系数先增大再减小。

(3) 超声振动大幅提高了体育器材用半固态铝合金的拉伸性能和硬度。超声振动处理后的试样抗拉强度提升了 25.3%, 伸长率提高了 69.4%, 硬度提高了 11.4%。

(4) 超声振动对体育器材用半固态铝合金的细化是空化效应和声流效应的作用。

#### 参考文献:

- [1] 王道君. 体育器材用镁合金/铝合金异质FSW接头的疲劳性能研究 [J]. 热加工工艺, 2015 (9): 228-230.
- [2] 张建伟, 王静, 李洋. 特殊体育器材用2A12铝合金的疲劳裂纹扩展机制研究 [J]. 铸造技术, 2015 (6): 31-33.
- [3] 孔琳琳, 李晓华. 体育器材用5052铝合金管件的磁脉冲连接工艺的试验研究 [J]. 轻合金加工技术, 2017, 45 (002): 59-64.
- [4] 刘爱军, 陈习智, 胡斌梁, 等. 7075-T6铝合金超声振动加工的试验研究 [J]. 机械制造, 2019, 57 (1): 83-86.
- [5] 杨途才, 李雪姿, 石登陆, 等. 超声波处理对铸造铝合金组织和力学性能的影响 [J]. 中国金属通报, 2019 (4): 109-110.
- [6] 曹飞, 蒋日鹏, 李晓谦, 等. 超声预处理对ZL205A铝合金铸件凝固组织的影响 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2018 (1): 31-38.
- [7] ABRAMOV V O, ABRAMOV O V, STRAUMAL B B, et al. Hypereutectic Al-Si based alloys with a thixotropic microstructure produced by ultrasonic treatment [J]. Materials & Design, 1997, 18 (s 4-6): 323-326.
- [8] 程和法, 黄笑梅, 杨俊, 等. 超声波处理对过共晶Al-20%Si合金组织的影响 [J]. 材料热处理学报, 2011, 32 (3): 35-39.
- [9] 冯丹艳. 超声振动对ZL101铝合金熔体凝固组织的影响 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (3): 96-99.
- [10] 王乐西, 吴文祥, 马科, 等. 超声振动对7055铝合金组织及力学性能的影响 [J]. 材料科学与工艺, 2010 (6): 838-842.
- [11] 何祚镛. 声学理论基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 437-444.

## Microstructure and Tensile Properties of Semi-Solid Aluminum Alloy Prepared by Ultrasonic Vibration for Sports Equipment

LU Chuan<sup>1</sup>, LIU Chao-meng<sup>2</sup>

(1. Department of Police Physical Education, Guangxi Police College, Nanning 530000, Guangxi, China; 2. Guangxi Normal University for Nationalities, Institute of Physical Education, Chongzuo 532200, Guangxi, China)

#### Abstract:

Semi-solid aluminum alloy slurry for sports equipment was prepared by ultrasonic vibration. The effects of ultrasonic vibration and ultrasonic temperature on the microstructure, tensile strength, elongation and hardness of the aluminum alloy for sports equipment were studied. The results show that ultrasonic vibration can significantly refine the microstructure of semi-solid aluminum alloy slurry, and the primary  $\alpha$ -Al particles are smaller and rounder. The tensile strength, elongation and hardness are increased by 25.3%, 69.4% and 11.4%, respectively. With decreasing ultrasonic temperature, the size of primary  $\alpha$ -Al particles increases, and the shape coefficient first increases and then decreases. The refinement effect of ultrasonic on the aluminum alloy is attributed to the cavitation effect and acoustic streaming produced by ultrasonic.

#### Key words:

ultrasonic vibration; sports equipment; aluminum alloy; ultrasonic temperature; tensile properties