

# 大功率超声处理对铸态 QAl9-4 铝青铜组织与性能的影响

吕海波, 刘祥玲, 索忠源, 姜峰, 王鑫

(吉林化工学院机电工程学院, 吉林吉林 132022)

**摘要:** 研究了大功率超声处理对铸态QAl9-4铝青铜组织与性能的影响。结果表明: 超声处理后合金中的 $\alpha$ 相转变为细小、均匀的等轴晶, K相则由不规则形状转变为相对较粗大的四边形, 其含量少于未施加超声处理的合金。超声处理后的合金的抗拉强度为569 MPa, 布氏硬度为HB141, 伸长率为18.9%。与未施加超声处理合金相比, 抗拉强度和硬度分别提高了11.6%和16.5%, 而伸长率则降低了31.3%。另外, 两种合金主要磨损形式均为磨粒磨损和粘着磨损, 超声处理后的合金耐磨性有所降低。

**关键词:** 大功率超声; QAl9-4铝青铜; 组织与性能

超声外场处理是近代发展起来的一种合金制备技术。合金在熔融态进行超声外场处理时, 超声波在熔体传播过程中会产生机械、空化、声流等效应, 能够显著细化组织, 改善合金性能<sup>[1-2]</sup>。超声处理技术设备相对简单, 合金制备成本较低, 因而其作为一种“绿色环保”的工艺而广泛应用在合金制备中。目前, 超声外场处理主要应用在铝、镁等合金领域, 在铜合金领域中应用较少, 本试验应用大功率超声处理QAl9-4铝青铜熔体, 研究其对合金铸态组织与性能的影响, 以为超声外场处理铝青铜的功率选择提供参考。

## 1 试验方法

QAl9-4铝青铜合金是将工业纯铝(纯度 $\geq 99.7\%$ )、工业纯铁(纯度 $\geq 99.8\%$ )、紫铜(纯度 $\geq 99.9\%$ )在ZG-5型中频感应电炉中熔炼制成, 合金熔炼时未采用保护气体。合金中的Cu、Al和Fe的质量配合比为87:9:4, 合金熔炼后实际化学成分见表1。合金熔炼过程采用精炼剂为 $C_2Cl_6$ 。

超声处理的QAl9-4铝青铜是将精炼后的合金熔体在1 050~1 100 °C条件下, 采用YP5020-82型超声处理仪进行超声处理, 处理时间设定为40 s, 功率为1 400 W。处理完毕的合金浇注成150 mm×80 mm×50 mm的块材, 空冷。对比用QAl9-4铝青铜采用相同工艺直接浇注成形。

用到的设备有: 万能电子试验机(型号为WAW-300)、金相光学显微镜(型号为TX-400V)、布氏硬度计(型号为HB-3000C)、扫描电镜(型号为JSM-6490LV)、X-射线衍射仪(型号为D8ADVANCE)。合金的摩擦磨损试验在销盘式多功能摩擦磨损试验机上进行, 试样尺寸为 $\phi 5$  mm×40 mm, 摩擦副采用45#钢, 硬度为HRC45, 磨损时间设定为30 min, 载荷30 N, 转速为200 r/min。试验对比分析了超声处理前后合金的铸态组织和性能的变化。

## 2 结果与讨论

### 2.1 合金铸态组织

图1为超声处理前后QAl9-4铝青铜XRD衍射图谱。结合图2合金的金相组织图能

作者简介:

吕海波(1981-), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为合金制备与性能分析。  
电话: 0432-62185424,  
E-mail: 635280443@qq.com

中图分类号: TG146.11  
文献标识码: A  
文章编号: 1001-4977(2020)11-1162-05

基金项目:  
吉林化工院校级重大项目(吉化院重大合字[2018]第012号)。  
收稿日期:  
2020-04-23 收到初稿,  
2020-07-21 收到修订稿。

够看出,两种合金的铸态组织均由 $\alpha$ 相、 $\beta'$ 相和点状分布的K相组成。由图1可以看出,未施加超声处理的QA19-4铝青铜的XRD衍射图谱中有明显的K相衍射峰,而超声处理后的QA19-4铝青铜可能是由于K相含量相对较少,其衍射峰不明显,因此在衍射图谱中未能标定出来。

图2为大功率超声处理前后两种合金的铸态金相显微组织。由图可以看出,大功率超声处理后的QA19-4铝青铜 $\alpha$ 相和 $\beta'$ 相较细小,合金中 $\alpha$ 相多为等轴晶,而未施加超声处理的QA19-4铝青铜 $\alpha$ 相则较粗大,呈树枝状分布。超声处理后合金中的 $\alpha$ 相由粗大的树枝晶转变为细小的等轴晶主要是由于在合金熔炼时施以大功率超声外场处理时,熔体中能够产生较大的机械能效应,这种效应减弱了合金初生枝晶之间的搭桥,加速枝晶臂的脱落,使枝晶重新熔入液相中,因此合金中 $\alpha$ 相由树枝晶转变为等轴晶<sup>[3]</sup>。合金中的 $\alpha$ 相和 $\beta'$ 相细化的原因则主要是由于大功率超声处理熔体时,合金中的原子处于激活状态,能量起伏较大,其突破势垒的能力也会增强,这样增大了形核几率,细化了合金中的组织<sup>[4]</sup>。除此之外,超声外场处理合金熔体时,在熔体中能够产生大量的空化泡,使合金熔体局部压强大幅增加,形成高温高压区,而当空化泡破裂时,能够产生瞬时高压流,打碎凝固的原子团,另外,空化泡的产生还能够增加合金熔体的过冷度,这些都能够增大形核率,使组织变得细小<sup>[5-7]</sup>。

空化泡临界半径与声压关系可以用式(1)、(2)表示<sup>[8]</sup>。

$$R_{\min}^3 + \frac{2\sigma}{p_0} R_{\min}^2 - \frac{32}{27} \frac{\sigma^3}{(p_m - p_0)} = 0 \quad (1)$$

$$R_{\min} = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} \quad (2)$$

式中: $R_{\min}$ 为最小气泡半径; $\sigma$ 为表面张力; $P_m$ 为声压幅值; $P_0$ 为静压力。

式(2)为式(1) $R_{\min}$ 的实解部分,式(2)中:

$$p = -\frac{1}{3} \left(\frac{2\sigma}{p_0}\right)^3, \quad q = -\frac{32}{27} \frac{\sigma^3}{(p_m - p_0)} + \frac{2}{27} \left(\frac{2\sigma}{p_0}\right)^3。$$

可知,熔体中的 $R_{\min}$ 与 $P_m$ 成反比,即超声波功率越大,空化泡半径越小,空化泡的数量将会增多,过冷生核作用加强<sup>[6, 9]</sup>。凝固温度变化与压力值的关系可用Clausius-Clapeyron方程表示<sup>[10]</sup>。

$$dT = \frac{T_m \Delta V}{\Delta H} dP \quad (3)$$

式中: $dT$ 为凝固温度变化; $T_m$ 为金属熔体由液相转变为固相的凝固温度; $\Delta V$ 为熔体凝固时的体积变化; $\Delta H$ 为焓变; $dP$ 为压力变化值。

由式可知,超声功率越大, $dP$ 则相应增大,过冷

表1 铝青铜合金化学成分

Table 1 Chemical composition of aluminum bronze  $w_B/\%$

Al	Fe	Cu	其他 (Sn、Zn、P、Pb、Si等)
8.85	3.91	87.01	0.23

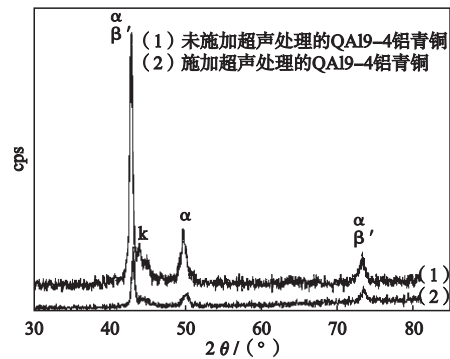


图1 合金铸态XRD衍射图谱

Fig. 1 XRD patterns of as-cast alloys

度也会增大,形核率将会提高。

相对于合金中的 $\alpha$ 相与 $\beta'$ 相,大功率超声处理后的K相则由原来相对细小的不规则形状转变为较粗大四边形组织,同时K相数量相对于未施加超声处理的合金有所减少。这主要是因为当铝青铜中Fe含量大于1%时,由于Fe熔点较高,其在凝固时先析出,形成K相<sup>[11]</sup>,这样就会造成超声对先析出的K相的处理时间相对较长,同时由于超声功率较大,熔体内能相应增大,由此引起的热效应促使合金熔体中温度升高,使得K相运动加剧,这样便会加大先析出的细小K相之间碰撞以及重熔的机会,在凝固初期被打碎的细小K相又重新组合,再次生长、团聚长大成相对较粗大的四边组织<sup>[12]</sup>。另外,合金熔体中施加超声处理可以加快凝固速度,使得Fe元素扩散时间减少,增加了合金元素Fe在基体中的固溶度<sup>[13]</sup>,因而大功率超声处理的QA19-4铝青铜K相的含量较未处理态有所减少。

## 2.2 合金力学性能

表2为两种合金的铸态力学性能。由表可以看出,超声处理后的QA19-4铝青铜硬度、抗拉强度高于未经过超声处理的QA19-4铝青铜,其中布氏硬度提高了16.5%,抗拉强度提高了11.6%。这主要因为,超声处理后的QA19-4铝青铜 $\alpha$ 相和 $\beta'$ 相得到了细化,合金中的 $\alpha$ 相由原来粗大的树枝晶变为细小、均匀的等轴晶;同时,超声处理后的硬质K相虽然在基体表面变得粗大且相对较少,弥散强化作用减弱,但由于较多的Fe相固溶到Cu中,固溶强化作用增强,因此施加超声处理的合金硬度、抗拉强度得到了提高。但超声处理

后的铝青铜的伸长率有所下降,这可能是因为未施加超声处理的QA19-4铝青铜K相相对细小,形状多为圆形,因而,合金在拉伸过程中位错线容易绕过K相粒子,这样避免了位错塞积而引起的应力集中,对基体的塑性变形不利影响较小,因而其伸长率较高。而超声处理后的合金中由于K相相对较大,且多为四边形,因而合金在拉伸过程中位错绕过粒子较难,塞积数量较多,产生的应力集中较大,易形成裂纹,对基体的塑性变形不利影响较大,这样就造成了合金在拉伸过程中过早的断裂,伸长率相对较低。

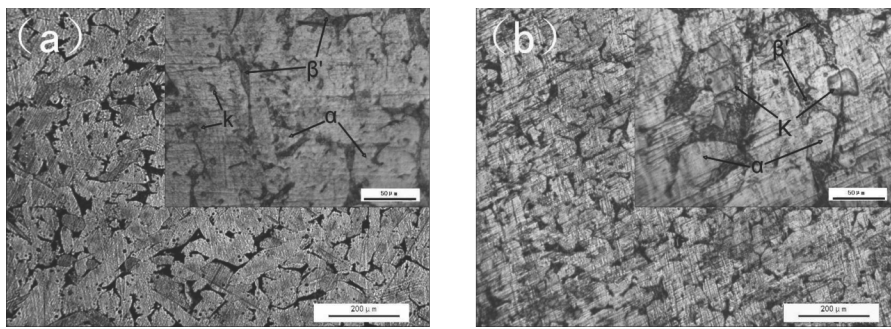
图3为两种合金的铸态拉伸断口形貌扫描图,由图可以看出两种合金断裂方式均以韧性断裂为主。超声处理后的铝青铜韧窝较大、较浅,部分区域能看见较小的准解理面;未施加超声处理的合金,其韧窝数量相对较多且较深,断口准解理面相对较少。由此可以

看出合金经过大功率超声处理后,韧性有所下降。

### 2.3 合金摩擦磨损性能分析

图4为两种合金摩擦系数随时间变化的曲线。由图可以看出,两种合金摩擦初期,摩擦系数相差不大,随着时间的增加,施加超声处理的QA19-4铝青铜摩擦系数逐渐高于未施加超声处理的合金。

图5为两种合金的磨损形貌扫描图。由图可知,两种合金磨损面均有磨粒、磨屑及凹坑的存在,沿滑动方向上均出现深浅不一的犁沟,这些是由于摩擦过程中合金中的部分K相脱落形成磨粒,从而造成磨粒磨损。另外,由于在摩擦过程中摩擦面层发生了塑性变形,导致了合金存有粘着磨损现象。综上可知两种合金磨损形式主要为磨粒磨损和粘着磨损。另外可以发现,超声处理后的合金磨粒、磨屑及凹坑相对较多,



(a) 未施加超声

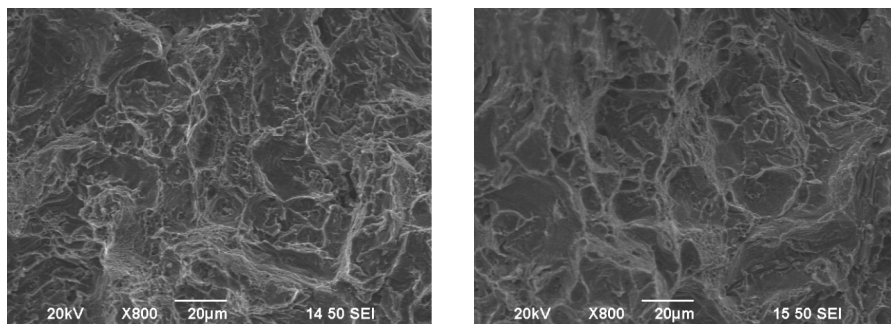
(b) 施加超声

图2 合金铸态显微组织

Fig. 2 Microstructure of as-cast alloys

表2 合金铸态力学性能  
Table 2 Mechanical properties of as-cast alloy

合金	硬度HB	抗拉强度/MPa	伸长率/%
未施加超声处理的QA19-4铝青铜	121	510	27.5
施加超声处理的QA19-4铝青铜	141	569	18.9



(a) 未施加超声

(b) 施加超声

图3 合金拉伸断口形貌图

Fig. 3 Tensile fracture morphologies of alloys

犁沟沟痕较宽，而未施加超声处理的QA19-4铝青铜磨粒、磨屑及凹坑则相对较少，犁沟较窄。产生这种情况主要是因为，一方面超声处理后合金的耐磨性由于硬度的提高而增强；另一方面，合金中K相的大小、数量及形态对耐磨性也会产生较大影响。超声处理后的合金中K相相对粗大，与基体结合较弱，在摩擦过程中更容易脱落，因而其在摩擦过程中磨粒磨损更为突出；另外，超声处理后的合金中的K相相对较少，弥散强化作用减弱，摩擦过程中，硬质K相与摩擦副接触变少，从而导致合金中的软相 $\alpha$ 相与摩擦副直接接触，磨损较大。基于这些原因造成了粗大的硬质K相脱落形成的磨粒磨损抵消了硬度对耐磨性的贡献，合金耐磨性有所降低。

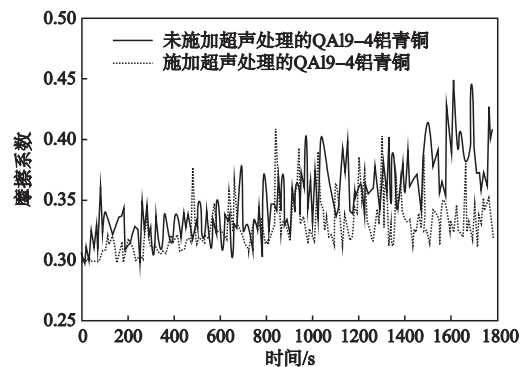
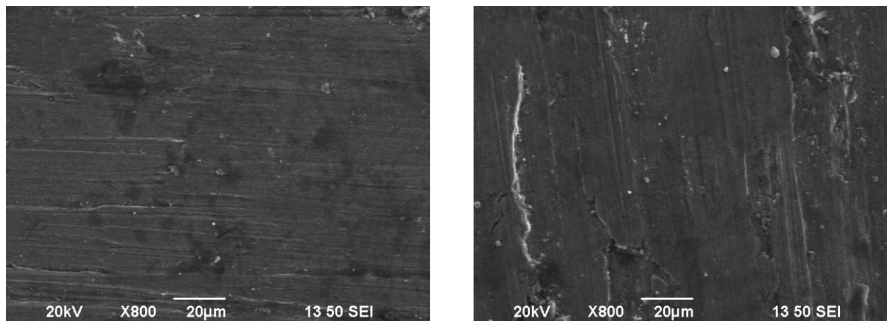


图4 合金摩擦系数随时间变化曲线  
Fig. 4 Changes of alloy friction coefficient with time



(a) 未施加超声

(b) 施加超声

图5 合金磨损形貌

Fig. 5 Worn surface morphologies of alloys

### 3 结论

(1) 大功率超声处理前后的QA19-4铝青铜铸态下的相组成均为 $\alpha + \beta' + K$ ，超声处理后的QA19-4铝青铜的 $\alpha$ 相由粗大的树枝晶变为细小的等轴晶，合金中的K相则由原来的不规则形状变为相对较粗大的四边形，含量低于未施加超声处理的铝青铜。

(2) 大功率超声处理后的QA19-4铝青铜布氏硬度为HB141，抗拉强度为569 MPa，伸长率为18.9%。与未进行超声处理的QA19-4铝青铜相比硬度提高了16.5%，抗拉强度提高了11.6%，伸长率则有所降低。

(3) 超声处理前后的QA19-4铝青铜磨损形式均以磨粒磨损和粘着磨损为主，超声处理后的合金耐磨性有所下降。

#### 参考文献:

- [1] 李晓谦, 李开晔, 陈铭, 等. 超声振动对7050铝合金熔体冷却时间及凝固组织的影响 [J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2011, 16 (2): 249-254.
- [2] 郭峰, 罗沛兰, 毕秋, 等. 金属熔体超声细化处理技术的研究进展 [J]. 金属材料与冶金工程, 2008, 36 (1): 59-64.
- [3] 蒋日鹏, 李晓谦, 李开晔, 等. 超声对铝合金凝固传热与组织形成的影响与作用机制 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2012, 43 (10): 3807-3813.
- [4] 钟贞涛, 李瑞卿, 李晓谦, 等. 超声处理对2219大规格铝锭微观组织与宏观偏析的影响 [J]. 工程科学学报, 2017, 39 (9): 1347-

1354.

- [5] 廖露亮, 尧军平, 张磊, 等. 超声处理对AS31镁合金组织及性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37 (10): 1150-1153.
- [6] 黄明哲, 李晓谦, 蒋日鹏, 等. 超声外场对7085铝合金基体组织及第二相的影响 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2015, 46 (7): 2439-2445.
- [7] 吴晗, 周全, 王俊, 等. 超声-合金化处理对Al-20Mg<sub>2</sub>Si合金组织和性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38 (4): 416-420.
- [8] 何祚镛. 声学理论基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1981.
- [9] 赵建华, 屈伸, 蒋文君, 等. 超声空化处理Al-5Ti-1B合金中第二相形貌的演变 [J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38 (9): 929-933.
- [10] 李新涛, 赵建强, 宁绍斌, 等. 功率超声对水平连铸Al-1%Si合金凝固的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35 (S2): 284-287.
- [11] 路阳, 金硯馨, 李文生, 等. Fe对高铝青铜摩擦磨损性能的影响 [J]. 材料导报, 2008, 22 (2): 135-137.
- [12] 秦新锋, 王建东, 郭巧琴, 等. 超声熔体处理对铝硅合金组织及性能的影响 [J]. 科技视界, 2017 (35): 11-12, 46.
- [13] 郭兴, 蒋日鹏, 李晓谦, 等. 超声处理铝合金熔体对半连铸大铸锭组织与偏析的影响 [J]. 热加工工艺, 2016, 45 (7): 25-29.

---

## Effect of High-Power Ultrasonic Treatment on Microstructure and Properties of As-Cast QA19-4 Aluminum Bronze

LYU Hai-bo, LIU Xiang-ling, SUO Zhong-yuan, JIANG Feng, WANG Xin

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin 132022, Jilin, China)

### Abstract:

The effect of high-power ultrasonic treatment on the microstructure and properties of as-cast QA19-4 aluminum bronze was investigated. The results show that  $\alpha$  phase in the alloy became fine and uniform equiaxed grains, K-phase was changed from an irregular form to a relatively large quadrilateral after ultrasonic treatment, and the content of K-phase was less than that of the alloy without ultrasonic treatment. The tensile strength of the alloy with ultrasonic treatment was 569 MPa, Brinell hardness was HB141, elongation was 18.9%. Compared with the alloy without ultrasonic treatment, the tensile strength and Brinell hardness increased by 11.6% and 16.5%, respectively, while the elongation decreased by 31.3%. Furthermore, the wear mechanism of the two alloys were abrasive wear and adhesive wear, and the wear resistance of the alloy with ultrasonic treatment decreased.

### Key words:

high power ultrasonication; QA19-4 aluminum bronze; microstructure and properties