

超声功率对 AlSi7MgCu2 合金组织及力学性能的影响

李便霞, 曾凡娇

(河南农业职业学院 机电工程学院, 河南郑州 451450)

摘要: 研究了不同超声功率对AlSi7MgCu2合金组织与性能的影响。结果表明, 当超声功率为1 400 W时, 合金的凝固组织中初生 α -Al相及共晶硅最为细小, 共晶硅形貌由未处理铸态合金中的针片状转变为细小的颗粒状和蠕虫状。此时, 合金的布氏硬度、抗拉强度和伸长率分别为HBW76.4、276 MPa和4.6%, 与未超声处理合金相比, 分别提高了13.02%、41.54%和84%。试样的断裂方式为韧性断裂, 合金的综合力学性能得到显著提高和改善。

关键词: AlSi7MgCu2合金; 超声处理; 显微组织; 力学性能

AlSi7MgCu2合金属于典型的亚共晶铝硅合金, 该合金具有质量轻、密度小、耐腐蚀性好、比强度高及良好的铸造性、气密性和热裂倾向小等诸多优点, 广泛应用于汽车工业领域, 如发动机缸体、汽缸盖等铸件^[1-3]。该合金在铸造过程中, 常出现粗大的初生 α -Al枝晶, 以及针片状的共晶硅组织, 从而导致合金综合力学性能降低。因此, 需要对合金中的共晶硅及初生 α -Al相进行组织细化^[1-2]。工业生产上合金组织细化的方法常常采用变质处理^[1-2]、机械搅拌^[4]、热处理^[5]、超声处理^[6-7]等手段。其中熔体超声处理技术是利用超声波在熔体中产生声流效应、空化效应和热效应, 从而改变熔体中的温度场和流场分布, 降低熔体中的气体, 改善合金组织偏析和晶粒细化的作用^[7-9]。

本文以AlSi7MgCu2合金为研究对象, 分析了不同超声功率对合金组织及力学性能的影响, 为该技术的实际应用提供工艺参数和理论依据。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

采用工业纯铝(纯度99.7%)、工业纯镁(纯度99.6%)、纯铜(纯度99.8%)以及Al-20%Si、Al-10%Mn中间合金熔炼AlSi7MgCu2合金, 采用TM-998Z直读光谱仪测定合金实际化学成分见表1所示。精炼除气剂为六氯乙烷(C₂Cl₆)。

1.2 试验方法及过程

将称好的工业纯铝块、纯铜块、Al-20%Si与Al-10%Mn中间合金, 一同放入井式坩埚电阻炉(型号SG2-5-10型, 额定功率5 kW,)中的粘土石墨坩埚中, 熔炼炉加热温度设置为750 °C, 保温1~1.5 h。待合金完全熔化后, 将铝箔包裹的纯镁用钟罩

作者简介:

李便霞(1983-), 女, 讲师, 主要从事机电一体化、智能控制等方面的研究。E-mail: 277128939@qq.com

中图分类号: TG146.21;
TG292

文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2022)
09-1139-05

收稿日期:

2022-02-07 收到初稿,
2022-03-11 收到修订稿

表1 AlSi7MgCu2合金化学成分

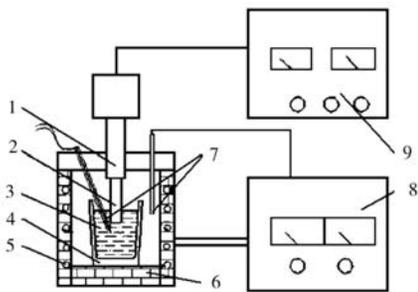
Table 1 Chemical composition of the AlSi7MgCu2 alloy

w_B /%

项目	Si	Mg	Cu	Mn	Al
名义成分含量	7.0	0.7	2	0.1	余量
实际含量	7.242	0.753	2.136	0.082	余量

压入熔体中,保温2 min。接着,加入熔体总重量0.5%的 C_2Cl_6 对合金液进行精炼除气、扒渣。然后,将坩埚转移至超声处理保温炉中,对合金熔体进行保温,将预热温度为500 ℃的超声波探头插入合金液面下2 cm左右。根据文献[10]可知,初生 α -Al相析出温度约为630 ℃,共晶相温度约为560 ℃。因此,当超声处理温度超过700 ℃以上时,熔体的过热温度较高,加之超声处理过程中产生热效应,使熔体温度持续偏高,使合金组织细化效果减弱。为此,本试验选择熔体温度为690 ℃,当熔体保温温度为690 ℃时,开始进行超声处理。每组超声处理功率分别为0、800 W、1 000 W、1 200 W、1 400 W、1 600 W、1 800 W,超声处理时间均为60 s。超声处理设备型号为YP5020-8220K,额定功率2 kW,其结构示意图见图1所示。当合金熔体经超声处理完毕后,浇注到已预热300 ℃的金属模具(模具尺寸为 $\phi 25$ mm \times 150 mm)中,得到金属试样。

采用DK7745型电火花数控线切割机切取短标距片状拉伸试样及组织观察试样(拉伸试样位置见图2)。



1. 超声波变幅杆 2. 超声波探头 3. 合金熔体 4. 石墨坩埚 5. 电阻丝 6. 保温炉 7. 热电偶 8. 温控仪 9. 数显超声波控制器

图1 超声处理装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the ultrasonic treatment device

将所截取试样经砂纸粗磨、细磨、抛光等标准程序制成金相试样,然后采用0.5%的HF水溶液腐蚀、清洗,乙醇擦拭吹干,用PTI金相显微镜观察合金组织形貌。使用WAW-300型万能拉伸试验机进行室温拉伸试验。采用JSM-6490型扫描电镜(SEM)观察断口表面形貌,利用HB-3000C电子布氏硬度计对处理后的试样进行硬度测量。

2 试验结果与分析

2.1 超声功率对合金显微组织的影响

图3为不同超声功率下的AlSi7MgCu2合金显微组织图。从图3中可看出,AlSi7MgCu2合金未经超声处理的铸态组织中,主要由初生 α -Al相和共晶硅组成。当合金未经超声处理(见图3a)时,合金组织的共晶硅形貌大多呈粗糙的细长杆状和针片状且带有锋利的边缘。当超声功率为800~1 000 W时,合金中的共晶硅形貌由细长针片状开始逐渐变短,开始出现纤维状和短杆状,初生 α -Al相尺寸明显开始减小,随着超声功率的不断增大(见图3d-e),针片状共晶硅形貌逐渐消失,其尺寸不断减小。当功率达到1 400 W时,合金中

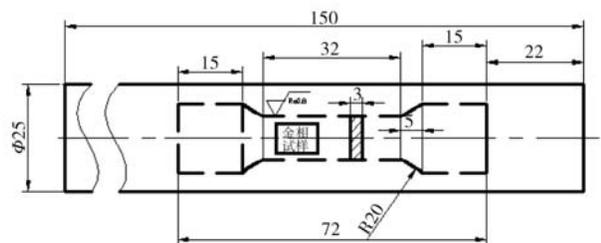


图2 拉伸试样及金相试样选取位置

Fig. 2 Sampling positions of the tensile specimen and metallographic specimen

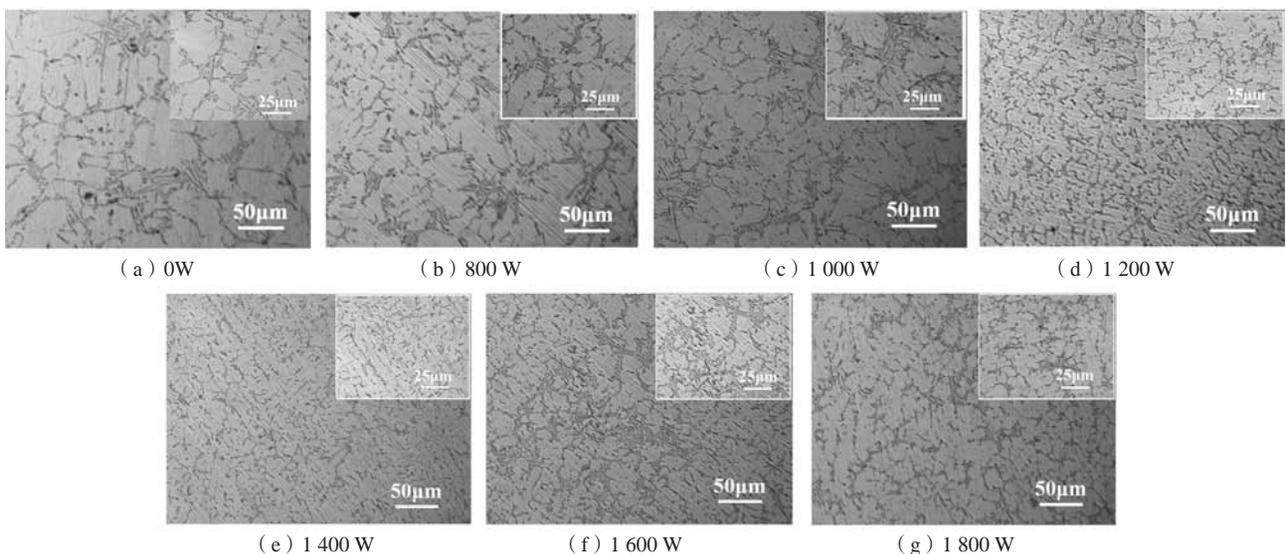


图3 不同超声功率下的AlSi7MgCu2合金显微组织

Fig. 3 Microstructures of the AlSi7MgCu2 alloy under different ultrasonic powers

的共晶硅形貌全部转变成颗粒状和蠕虫状,同时,初生 α -Al相尺寸全部转变成较为细小的等轴晶。当超声功率超过1 400 W(图3f-g)时,合金中的共晶硅尺寸开始粗化,其形貌再次出现细小的针片状和短杆状;同时,初生 α -Al相开始长大、粗化,但其尺寸仍小于未超声处理的合金组织。

AlSi7MgCu2合金中初生 α -Al相和共晶硅细化的主要原因,是由于熔体经超声处理时,合金熔体内部金属原子处于激活状态,能量起伏较大,增大熔体内部团簇的形核几率,从而细化了合金的凝固组织^[11-12]。当合金熔体在超声处理过程中,会在合金熔体内部产生大量的空化泡,使熔体中局部压强大幅增加,从而产生高温高压区。当空化泡破裂时,瞬间产生高压流,打碎已凝固的原子团簇;此外,空化泡的产生可增加合金熔体的过冷度,进而增大形核率,促使组织变得细小^[13-15]。超声空化泡临界半径与声压关系可用式(1)^[16]表述:

$$R_{\min}^3 + \frac{2\sigma}{P_0} R_{\min}^2 - \frac{32}{27} \frac{\sigma^3}{(P_m - P_0)} = 0 \quad (1)$$

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

根据式(2) Clausius-Clapeyron方程^[12]可知,

$$dT = \frac{2T_m \Delta V}{\Delta H} dP \quad (2)$$

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; ΔV 为熔体凝固时的体积变化; ΔH 为焓变; dP 为压力变化值。

从式(1)可知,合金熔体中的超声空化泡临界半径 R_{\min} 与声压 P_m 成反比,即当超声功率越大时,则空化泡半径越小,从而导致空化泡的数量增多,过冷形核作用加强^[15, 17]。由式(2)可知,当超声功率增大时, dP 相应增大,从而使熔体的过冷度增加,形核率提高。当超声功率较高(超过1 400 W)时,合金熔体的内能相应增大,此时,超声产生热效应,造成熔体局部过热,促使熔体内部温度升高,使得在凝固初期先析出被打碎的细小初生 α -Al相碰撞、重新熔合,从而使其再次生长、团聚和长大,形成较为粗大等轴晶组织(见图3f-g)。因此,当合金熔体保温温度较高(690℃)时,熔体超声处理功率不易过高。

2.2 超声功率对合金力学性能的影响

图4超声功率对AlSi7MgCu2合金布氏硬度的影响曲线图。从图4中看出,随着超声功率的不断增大(0~1 400 W),合金的布氏硬度值不断增加。当超声功率超过1 400 W时,合金的布氏硬度值逐渐降低。当熔体超声处理功率为1 400 W时,此时合金的布氏硬度值最大,为HBW76.4,而未经超声处理合金的布氏硬

度为HBW67.6。熔体超声处理后,铝合金的布氏硬度提高了13.02%。

由图5可知,随着超声功率的不断增大,合金的抗拉强度和伸长率均呈现先增加而后降低的趋势。未经超声处理合金的抗拉强度和伸长率分别为195 MPa和2.5%,当熔体超声功率达到1 400 W时,合金的抗拉强度和伸长率均达到最大值,分别为276 MPa和4.6%,与未超声处理合金相比,抗拉强度和伸长率分别提高了41.54%和84%。

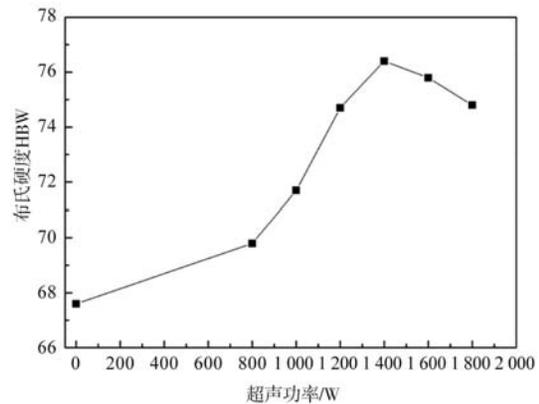


图4 不同超声功率处理下的AlSi7MgCu2合金的布氏硬度曲线图
Fig. 4 Brinell hardness curves of the AlSi7MgCu2 alloy treated with different ultrasonic powers

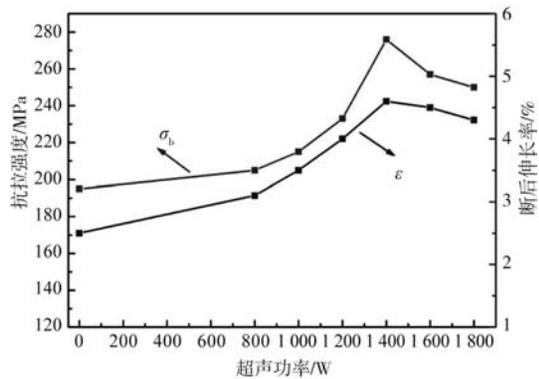
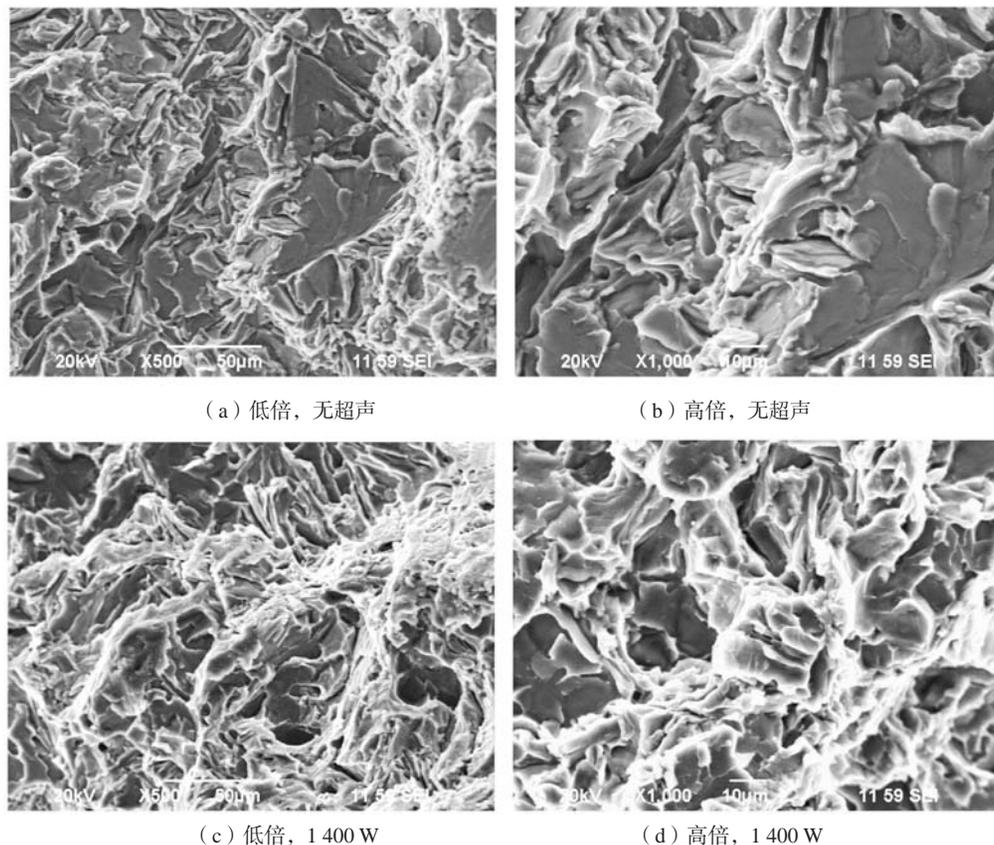


图5 不同超声功率处理下的AlSi7MgCu2合金的抗拉强度和伸长率曲线图
Fig. 5 Tensile strength and elongation curves of the AlSi7MgCu2 alloy treated with different ultrasonic powers

图6为超声处理前后AlSi7MgCu2合金的断口形貌图。由图6a-b可见,未经超声处理的合金试样表面出现较粗大的光滑解理平台与平面,平面内呈河流花样,平台两侧出现较为平直的断裂棱,韧窝较少,断裂模式为脆性断裂。当合金经过1 400 W超声处理时(见图6c-d),粗大的光滑解理面消失;同时,合金试样断口出现大量深浅不等,尺寸不同的韧窝,断裂方式为韧性断裂。



(a) 低倍, 无超声

(b) 高倍, 无超声

(c) 低倍, 1 400 W

(d) 高倍, 1 400 W

图6 超声处理前后AlSi7MgCu2合金的断口形貌

Fig. 6 Fracture morphologies of the AlSi7MgCu2 alloy before and after ultrasonic treatment

3 结论

(1) 在690 ℃保温, 经1 400 W超声处理的AlSi7MgCu2合金熔体得到的凝固组织最为细小, 共晶硅形貌由未处理合金中的针片状转变为颗粒状和蠕虫状。

(2) 在690 ℃保温, 经1 400 W超声处理合金熔体后, 所获得合金试样的综合力学性能显著提高, 其布氏硬度、抗拉强度和伸长率分别为HBW76.4、276 MPa和

4.6%, 与未超声处理合金相比, 分别提高了13.02%、41.54%和84%。

(3) 未经超声处理的合金试样断口表面韧窝较少, 同时出现不同大小的光滑平面, 其断裂方式为脆性断裂, 而经1 400 W超声处理后, 合金断口出现大量尺寸不等的韧窝, 粗大的解理面消失, 其断裂方式为韧性断裂。

参考文献:

- [1] 赵娜, 朱随群, 曹懿. 添加微量金属元素影响AlSi7Mg合金性能的研究综述 [J]. 上海电力学院学报, 2019, 35 (3): 272-276.
- [2] 吴星. 稀土La对AlSi7Cu2Mg合金组织与性能的影响 [J]. 铸造技术, 2018, 39 (9): 1923-1927.
- [3] 卫振华, 毛红奎, 张文达, 等. 热等静压对铸造AlSi7Cu2Mg合金缺陷及性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41 (3): 349-352.
- [4] 李泽华, 冯志军, 石飞, 等. 机械搅拌制备SiC_p/AlSi7Mg2复合材料性能研究 [J]. 铸造, 2018, 67 (2): 125-130.
- [5] 胡文全, 闵铜, 唐明忠. 热处理对AlSi7.5Cu2Mg0.2合金组织与性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2012, 41 (8): 194-197.
- [6] 李康, 李晓谦, 李瑞卿, 等. 铸造过程中超声处理对2219铝合金固溶后组织和性能的影响 [J]. 铸造技术, 2018, 47 (13): 18-22.
- [7] 赵志伟, 关博文, 张栋. 超声功率对Al-14Mg-7Si合金组织与性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40 (12): 1411-1414.
- [8] 陆向科, 王孟君, 李新涛, 等. 超声波功率对半连续铸造6013铝合金组织与力学性能的影响 [J]. 轻合金加工技术, 2019, 47 (5): 25-29, 51.

- [9] 雷吉, 平余剑, 武罗红, 等. 超声振动和微量Sr+Sc对A380合金组织的影响及作用机理 [J]. 振动与冲击, 2018, 37 (19): 112-117.
- [10] 毛红庚, 党惊知, 刘智锋. 激冷作用对ZLSi7Cu2Mg合金组织及性能的影响 [J]. 铸造技术, 2014, 35 (4): 763-765.
- [11] 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.
- [12] 吕海波, 刘祥玲, 索忠源, 等. 大功率超声处理对铸态QA19-4铝青铜组织与性能的影响 [J]. 铸造, 2020, 69 (11): 1162-1166.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 吴晗, 周全, 王俊, 等. 超声-合金化处理对Al-20Mg2Si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.
- [16] 何祚镛. 声学理论基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1981.
- [17] 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.

Effect of Ultrasonic Power on Microstructure and Mechanical Properties of AlSi7MgCu2 Alloy

LI Bian-xia, ZENG Fan-jiao

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Vocational College of Agriculture, Zhengzhou 451450, Henan, China)

Abstract:

The effect of different ultrasonic powers on the microstructure and properties of AlSi7MgCu2 alloy was studied. The results showed that when the ultrasonic power was 1 400 W, the primary α -Al phase and eutectic silicon of the alloy were the smallest, and the morphology of eutectic silicon changed from needle-like in untreated as-cast alloy to fine granular and worm-like. At this time, the Brinell hardness, the tensile strength and elongation of the alloy were HBW76.4, 276 MPa and 4.6%, respectively. Compared with the alloy without ultrasonic treatment, they were increased by 13.02%, 41.54% and 84%, respectively. The fracture mode of the sample was ductile fracture, and the comprehensive mechanical properties of the alloy were significantly enhanced and improved.

Key words:

AlSi7MgCu2 alloy; ultrasonic treatment; microstructure; mechanical properties