

熔体超声振动对 ZL105 合金组织及力学性能的影响

刘军伟, 白 祥

(江苏安全技术职业学院, 江苏徐州 221000)

摘要: 采用熔体超声振动的方式对ZL105进行处理, 在球-盘式摩擦磨损试验机上进行磨损试验, 研究了不同超声功率对合金摩擦磨损性能的影响。利用光学显微镜分析合金的组织变化, 使用显微硬度计及电子万能拉伸试验机测试合金的显微硬度及拉伸强度。研究结果表明: 超声振动能够有效的细化 α -Al相的晶粒尺寸, 大幅减小其二次枝晶臂间距, 并且超声振动对共晶Si相也有显著的细化作用, Si相的平均纵横比由超声振动前的5.5降低至超声振动后的1.3。当超声振动功率达到1 400 W时, 合金的显微硬度、抗拉强度及伸长率均达到峰值, 分别为HV 103.25、229.73 MPa及4.9%。另外, 合金的摩擦磨损性能也达到最优, 合金的磨损量及摩擦因数分别为0.097 8 mg和0.52, 比未经超声振动处理的ZL105合金分别降低了19.18%和12.31%。

关键词: ZL105合金; 超声振动; 显微组织; 拉伸性能; 硬度; 摩擦磨损性能

作者简介:

刘军伟(1987-), 男, 讲师, 研究方向为材料成形及机械制造。电话: 15852325037, E-mail: 05281015@163.com

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)10-1322-07

基金项目:

2022年江苏省高职院校青年教师企业实践培训项目(2022QYSJ009)。

收稿日期:

2023-02-21 收到初稿,
2023-08-14 收到修订稿。

ZL105铝合金作为Al-Si合金的一种, 因其具有质量轻、机械加工性能及铸造性能好, 已经在机械制造、电子设备及汽车工业等领域得到广泛应用^[1-3]。由于铸造Al-Si合金结晶温度区间较宽, 在合金凝固后组织中容易形成粗大的枝晶状 α -Al相及共晶相, 这些不规则且粗大的第二相极大的降低了合金铸件的力学性能^[4-6]。因此, 通过优化传统凝固工艺来提高合金铸件的品质及性能很有必要。其中, 熔体超声处理作为一种操作简便、成本低的工艺, 已经被许多学者认为是一种有效细化合金组织的可行技术; 其主要是通过高能超声振动的方式在熔体中产生一系列的非线性效应, 如声流效应、热效应及空化效应等, 进行改善熔体中的温度场及流场分布, 达到细化晶粒和消除第二相偏析的作用^[7-9]。陈杼鑫等人^[10]研究了不同超声处理时间对Al-2Cu合金微观组织及除气效果的影响。结果表明: 对合金施加超声波振动后, 合金的晶粒度得到了明显的减小, 晶粒尺寸及形状逐渐变得圆整, 趋于等轴晶。当超声功率为2 000 W, 超声时间为90 s时, Al-2Cu合金铸锭密度达到最高, 为2.726 g/cm³, 除气率为67%。王乐西^[11]等人对7055铝合金进行超声振动处理, 探究超声振动前后7055铝合金组织及力学性能演变。研究结果表明: 未进行超声振动的7055铝合金组织为明显的树枝晶, 晶粒粗大, 晶粒尺寸在300 μ m以上, 而对7055铝合金施加超声振动后, 合金的组织转变为细小均匀的非枝晶组织。超声振动前7055合金的压缩屈服强度、抗压强度及其对应的名义应变分别为121 MPa、606.6 MPa和29.0%, 超声振动后分别为165 MPa、729 MPa和34.8%。目前关于超声处理优化铝合金的研究主要集中在组织及强度等方面的报道, 而关于摩擦磨损性能的报道很少。因此, 本课题通过在ZL105合金凝固过程中引入超声波振动, 研究不同超声功率对ZL105合金的微观组织及摩擦磨损性能的影响, 并分析了其作用机理。

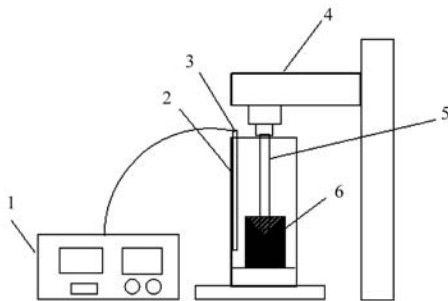
1 试验材料与方法

本次试验对象为ZL105铝合金, 其化学组成如表1所示。在SC-7.5-10型坩埚电阻

表1 ZL105铝合金的化学成分
Table 1 Chemical composition of the ZL105 alloy $w_B/\%$

Si	Cu	Mg	Zn	Fe	Mn	Al
5.41	1.15	0.45	0.22	0.69	0.28	余量

炉内对ZL105合金进行熔炼处理。ZL105合金熔炼温度为760 ℃，保温20 min；待合金全部熔化后用 C_2Cl_6 精炼剂对合金进行精炼除气；待熔体降温至720 ℃后对其进行超声波处理；将预热至400 ℃的超声波变幅杆探头伸入熔体液面以下30 mm处；超声振动功率为0、800 W、1 400 W及2 000 W，超声振动持续时间5 min，超声频率为20 kHz；超声波振动工作原理示意图如图1所示。超声振动结束后将熔体浇注于预热至220 ℃的钢制模具中，待合金样品冷却后取出。



1. 温度控制器 2. 电阻炉 3. 热电偶 4. 升降台
5. 超声波变幅杆 6. 熔融金属液

图1 超声波振动工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ultrasonic vibration working principle

合金样品通过线切割的方式制成20 mm × 20 mm × 2.5 mm的方形摩擦磨损试块，在UMT-2型球-盘式摩擦磨损试验机上进行摩擦磨损测试。在试验前对方形摩擦磨损试块进行粗磨和细磨，然后在超声波清洗池内清洗。摩擦形式为球-盘式圆周摩擦，直径为9.38 mm的45号钢球作为对磨材料，施加载荷为12 N，摩擦盘转速为200 r/min，持续时间为15 min，试验温度为室温，相对湿度RH为50%~65%。采用精度为0.1 mg的电子天平测试试验前后方形摩擦磨损试块的质量，由此计算材料的摩擦磨损质量损失量。

检测试样均在铸造合金试棒中部同一位置处截取，然后用SiC砂纸对试块进行粗磨、细磨，机械抛光，采用0.5 vol.% HF水溶液对试块进行刻蚀，无水乙醇清洗干净、自然晾干。利用Leica DM2500M型光学显微镜观察合金样品的铸态组织形貌。利用DHV-1000AV型数显硬度计对合金样品进行硬度测试，外加荷载为9.8 N，持续时间为10 s，每组样品测试5次，取平均值作为硬度值。利用SANS-CMT510型电子万能拉伸试验机对合金样品进行拉伸测试，拉伸速率为0.5 mm/min，

拉伸结果为3个拉伸数据的平均值，拉伸试样尺寸如图2所示。

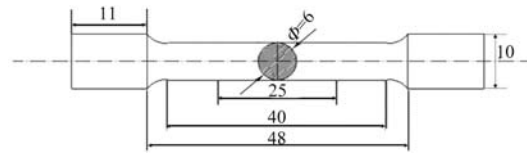


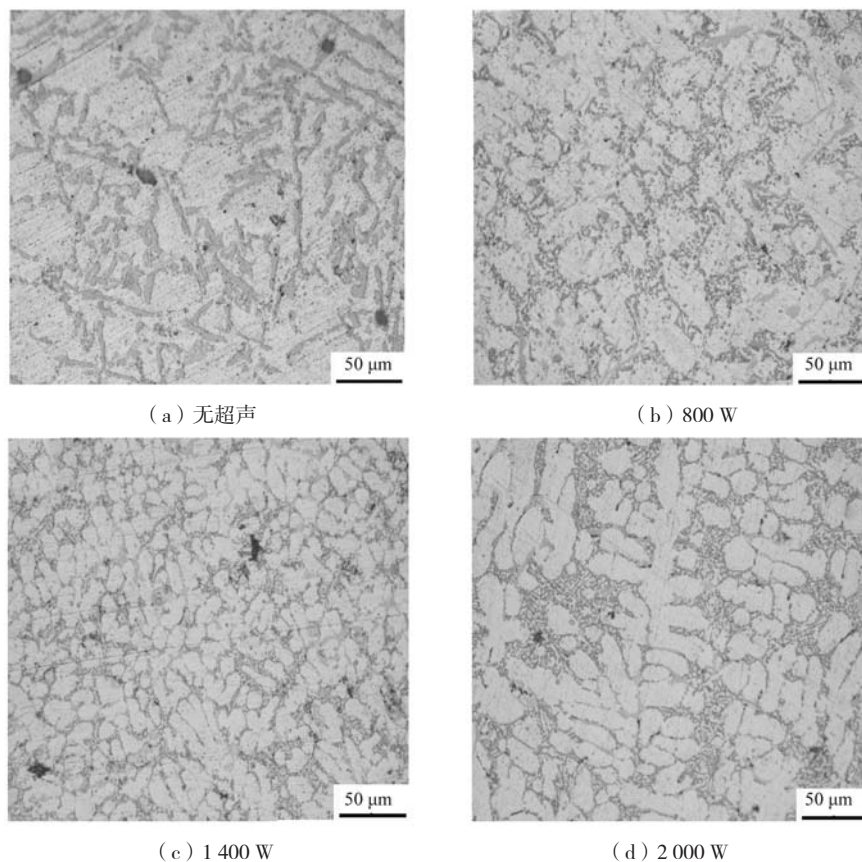
图2 拉伸棒的试样图

Fig. 2 Illustration of the tensile test sample

2 试验结果与讨论

2.1 超声振动功率对 ZL105 合金组织的影响

图3为不同超声处理后ZL105合金的金相组织图片。为了更好的分析超声处理对合金的细化作用，利用IPP软件对合金的组织进行了定量分析，分析结果如图4所示。未进行超声处理的ZL105铸态合金的组织主要为粗大的树枝晶， α -Al相二次枝晶臂间距大（图3a），其二次枝晶臂间距为58 μm （图4a），共晶Si相为针片状形貌，棱角锋利且尖锐，对Al基体会产生割裂作用，从而使得合金性能的降低，共晶Si相的平均纵横比为5.5（图4b）。合金进行超声处理后，粗大的枝晶被明显细化， α -Al相的二次枝晶臂的间距明显减小（图3b），二次枝晶臂的间距减小至46 μm （见图4a），共晶Si相也得到了细化，变为短棒状（图3b），Si相的平均纵横比为2.2（图4b）。当超声功率为1 400 W时，粗大的枝晶消失， α -Al相形貌变得圆整有规律，趋向于等轴晶，轮廓也变得清晰，二次枝晶臂间距大大减小（图3c），二次枝晶臂间距为21 μm （图4a），比未超声处理的ZL105合金减小了37 μm ，共晶Si相均匀的分布于 α -Al相周围，已经转变为球颗粒状或纤维状（图3c），Si相的平均纵横比为1.3（图4b），比未超声处理的ZL105合金减小了4.2，超声处理对合金的组织形貌具有良好细化作用。然后继续加大超声功率达到2 000 W后，ZL105合金的组织开始粗化， α -Al相变得不规则且趋于椭圆状，二次枝晶臂间距增大（图3d），达到33 μm （图4a）。 α -Al相粗化的主要原因是过高的超声功率导致熔体内热能增大，产生热效应，使得熔体局部过热，在凝固前期优先析出的细小 α -Al相相互碰撞、再熔合，进而长大变成粗大的椭圆状第二相。共晶Si相仍然呈现出球颗粒状或纤维状，但是Si相偏析严重，分布不均匀，Si相的聚集容易造成局部应力集中，这样会极大的降低合金的力学性能（图3d），其中Si相的平均纵横比为1.9（图4b）。综上所述，超声处理的引入对合金的组织带来了极好的细化作用，其中超声功率为1 400 W时，组织形貌最佳。



(a) 无超声

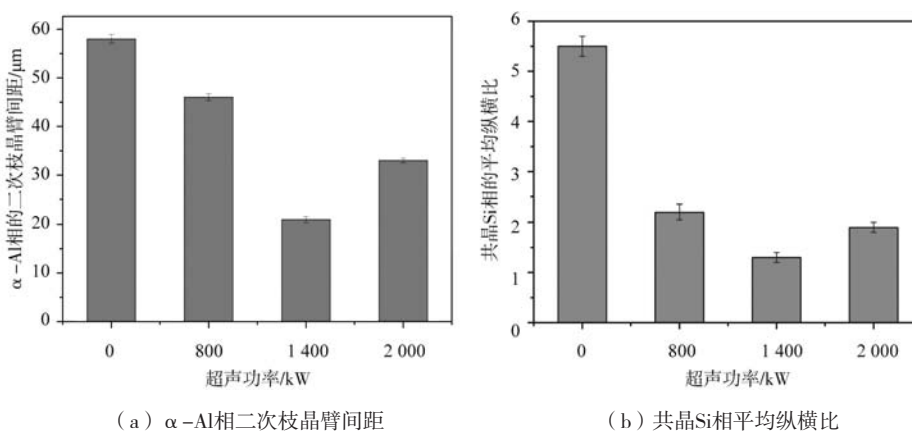
(b) 800 W

(c) 1 400 W

(d) 2 000 W

图3 不同超声处理下铸态ZL105合金的微观组织图片

Fig. 3 Microstructure of as-cast ZL105 alloy under different ultrasonic treatment



(a) α-Al相二次枝晶臂间距

(b) 共晶Si相平均纵横比

图4 不同超声处理下铸态ZL105合金的α-Al相二次枝晶臂间距及共晶Si相平均纵横比

Fig. 4 The α-Al phase secondary dendrite arm spacing and eutectic Si phase average aspect ratio of as-cast ZL105 alloy under different ultrasonic treatment

2.2 超声振动功率对 ZL105 合金力学性能的影响

图5为不同超声振动功率处理后铸态ZL105合金的拉伸性能。从图5可知，未经超声振动处理的ZL105合金，其抗拉强度及伸长率最低，分别为172.61 MPa和3.1%，这是由于基体组织内粗大的枝晶及针片状共晶Si相极大的削弱了合金的强度及塑性。随着对合金熔体施加超声功率的逐渐增大，合金的强度及塑性呈现出

逐渐升高而后降低的趋势。当超声功率达到1 400 W时，合金的抗拉强度及伸长率达到峰值，分别为229.73 MPa和4.9%，比未经超声处理的ZL105合金分别提高了33.09%和58.06%，由于经过超声处理后合金组织内的α-Al相二次枝晶臂的间距大大缩小，晶粒形貌逐渐变得圆整且规律，晶粒尺寸也被细化，根据Hall-Petch理论^[12]：

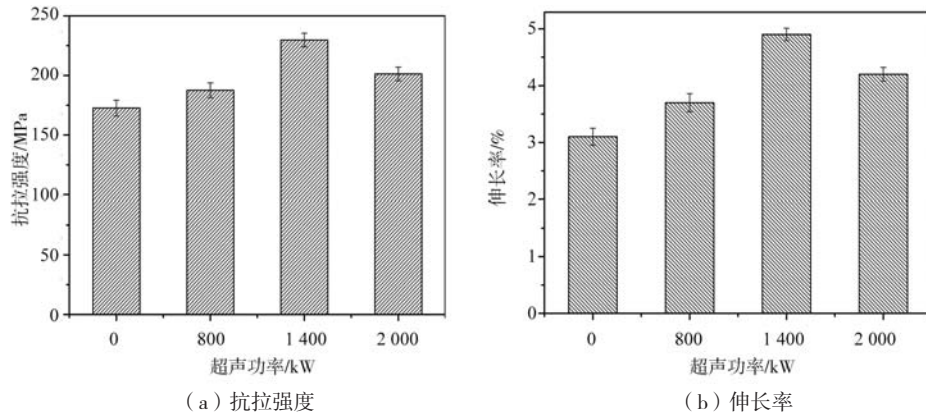


图5 不同超声处理下铸态ZL105合金的拉伸强度及伸长率

Fig. 5 Tensile strength and elongation of as-cast ZL105 alloy under different ultrasonic treatment

$$\sigma_s = \sigma_0 + kd^{1/2} \quad (1)$$

式中： σ_s 表示屈服强度， σ_0 为材料常数， k 为常数， d 表示晶粒大小。

合金的强度与合金的晶粒尺寸成反比，也就是合金晶粒尺寸越小，则合金的强度越高，这是因为晶粒越小，阻碍位错滑移的力越大，使单位面积上受力增加，所以强度增加^[13]。然而，当超声功率达到2 000 W时，合金的抗拉强度及伸长率有所降低，分别为201.27 MPa和4.2%，但是与未超声处理的合金相比仍有比较明显的提高。

图6为不同超声处理后铸态ZL105合金的显微硬度。从图中可以观察到未经超声处理的ZL105合金的显微硬度仅为HV77.31。对合金熔体进行超声处理后ZL105合金的显微硬度有了明显的提升。超声功率为800 W、1 400 W和2 000 W时，合金的显微硬度分别为HV86.28、HV103.25及HV96.66。超声处理后合金的显微硬度均比未超声处理的ZL105合金明显提高，这主要是因为ZL105合金组织内存在适合形成原子排列的短程有序和混乱分布区，其中强度最高的Si-Si键极易团

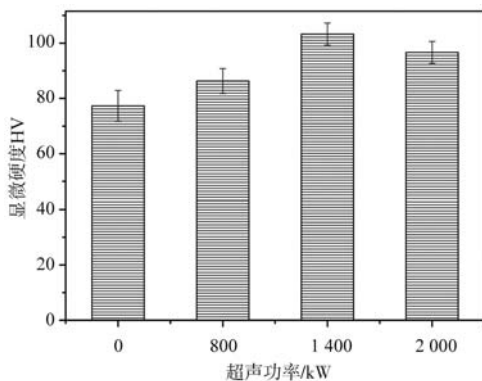


图6 不同超声处理下铸态ZL105合金的显微硬度

Fig. 6 Microhardness of as-cast ZL105 alloy under different ultrasonic treatment

聚。在ZL105合金熔体内引入超声处理时，合金熔体内会产生大量的空化泡，在周期性声压的作用下空化泡不断长大、膨胀、最终破裂，在空化泡破裂时，局部区域会产生瞬时高温高压现象，即空化效应，产生巨大的能量，对合金组织内的Si-Si键具有极大的冲击作用，由此减少了Si相的偏聚。其次，超声处理合金熔体时，由于周期性的应力和声压变化，在声波的波面处形成很强的压强梯度，因而在结晶平面前沿抑制硅相生长，抑制了共晶Si的择优生长，有利于液相中的硅原子在择优生长方向的侧面沉积、生长。在Si相长大的同时促使其向球团化转变，并有利于共晶Si由长针状转变为球颗粒状，从而降低了不规则针片状Si相对Al基体不利影响，进而有效的提高了合金的强度及硬度^[14-15]。

2.3 超声振动功率对 ZL105 合金摩擦磨损性能的影响

如图7为不同超声处理下铸态ZL105合金的摩擦磨损表面形貌。未施加超声振动的ZL105合金磨损SEM形貌见图7a，施加超声振动前合金表面磨损形貌较为粗糙且不整洁，数条宽尺寸的沟壑状犁沟沿滑动摩擦方向排布，局部区域面积较大的凹坑清晰可见，且在磨损表面附着少量零星散落的颗粒状磨屑。因为摩擦副的表面硬度远大于合金表面的硬度，摩擦副表面的粗糙峰嵌入较软的合金表面产生压痕。随着摩擦滑动的不断进行对合金表面产生大尺寸的切削作用，其中颗粒状的磨屑是由于粗糙峰表面之间相互咬合-滑动-碰撞-脱落而形成^[16]。由此可知ZL105合金存在粘着磨损和磨粒磨损两种磨损机制。图7b为超声振动功率为800 W时ZL105合金磨面的磨损形貌照片（SEM）。由图可以看出，合金的磨面形貌改善并不明显，尺寸较为宽大的犁沟非常明显，并且坑槽随处可见，但是坑槽的面积和深度较小，没有非常严重。粘着磨损的发生主

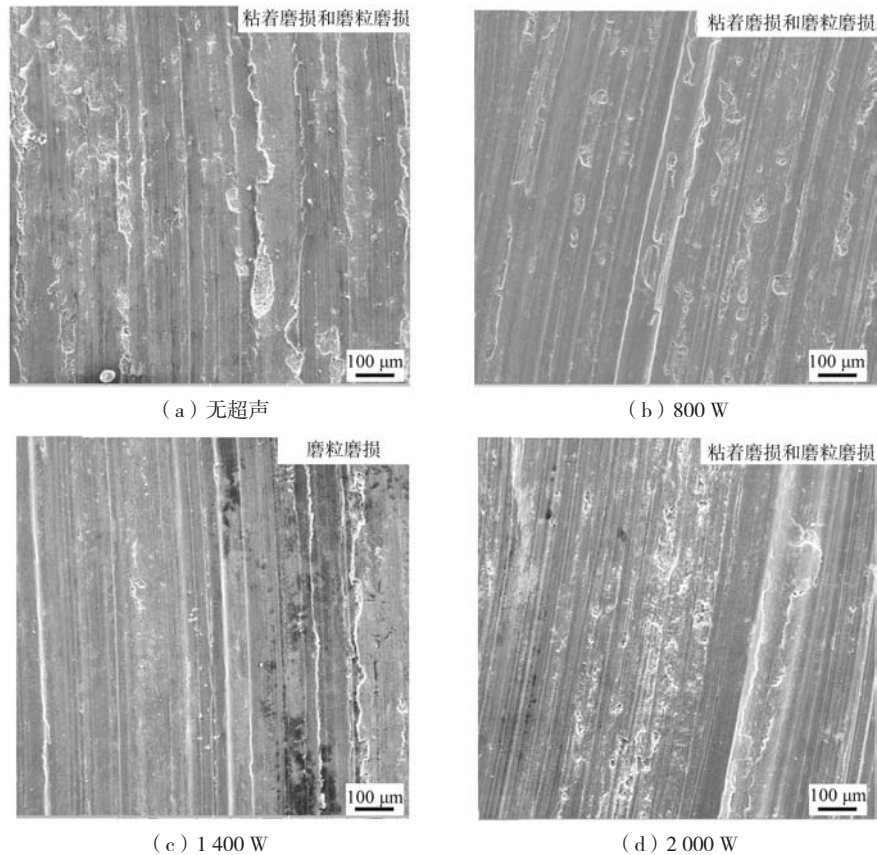


图7 不同超声处理下铸态ZL105合金的摩擦磨损形貌图片

Fig. 7 Friction and wear morphology of as-cast ZL105 alloy under different ultrasonic treatment

要是因为基体组织内存在较多不规则且尺寸较为粗大的共晶Si相，这些共晶相在摩擦载荷的作用下极易产生局部应力集中，引起局部的塑性变形，使得接触面的原子之间产生粘着。粘着点从较软的一方被剪切转移到较硬的一方金属表面，随后以磨屑的形式脱落^[17]，此时合金仍然是以粘着磨损和磨粒磨损为主。图7c为超声振动功率为1 400 W时ZL105合金的磨面SEM。磨

损表面形貌逐渐好转，磨面较为整齐光滑，只观察到较多的平行排列的犁沟和轻微刮擦痕，是典型的磨粒磨损的磨损机制。图7d为超声振动功率为2 000 W时ZL105合金的磨面形貌，出现了比较多的粘着点和轻微的刮擦痕迹，合金的磨损量较低，耐磨性能较好，粘着磨损和磨粒磨损占主导地位。

图8为不同功率超声处理下铸态ZL105合金的摩擦

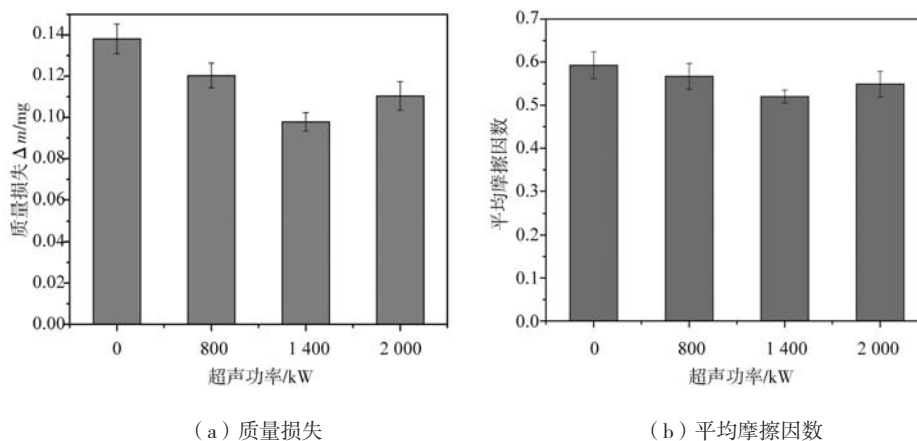


图8 不同超声处理下铸态ZL105合金的摩擦磨损质量损失及平均摩擦因数

Fig. 8 Friction and wear mass loss and average friction coefficient of as-cast ZL105 alloy under different ultrasonic treatment

磨损质量损失及平均摩擦因数柱状图。由图8a可知,随着施加的超声处理功率的逐渐增加,ZL105合金的磨损量逐渐减少至波谷后再增大。其中未施加超声处理的ZL105合金磨损量最高,为0.138 1 mg,而施加超声功率为1 400 W的ZL105合金的磨损量为0.097 8 mg,与未进行超声振动处理的合金相比降低了29.18%。由于超声处理极大的细化了合金的组织,使得共晶Si相由针片状转变为短棒状形态,减少了Si相对合金基体的割裂作用,减少了摩擦磨损过程中合金基体的破损,并且超声处理极大的提高了合金的强度及硬度。根据大量研究^[18-19]发现:材料的硬度越高,其耐磨性能越好,由图6可知超声功率为1 400 W时合金的硬度达到峰值,其耐磨性能也达到最佳。而继续提高超声振动功率,合金的磨损量突然增大,这应该是合金组织开始粗化,强度及硬度开始降低所导致的。图8b中四种超声功率下的ZL105合金平均摩擦因数分别为0.593、0.567、0.52和0.549,总体维持在0.5~0.6之间,超声功率对合金的摩擦因数的影响并不大。

3 结论

(1) ZL105合金经过超声振动处理后,在空化和声流效应的作用下合金组织内的共晶Si相的尺寸明显减小,由未超声振动处理时的针片状转变为超声振动处理后的纤维状,并且Si相的分散性也得到了提高。此外超声处理后合金的 α -Al相变得更加圆整和有规律,趋向于等轴晶,二次枝晶臂间距也大大缩小,整体上观察组织形貌得到了显著改善。

(2) 随着超声振动功率的逐渐增大,ZL105合金的强度及硬度均呈现出先逐渐升高至峰值后下降的趋势,当超声功率为1 400 W时,合金的显微硬度、抗拉强度及伸长率分别为HV103.25、229.73 MPa及4.9%,分别比未超声处理的ZL105合金提高了33.55%、33.09%和58.06%。

(3) 随着施加的超声处理功率的逐渐增加,ZL105合金的磨损量逐渐减少至波谷后再增大,其中未施加超声处理的ZL105合金磨损量最高,为0.138 1 mg,而施加超声振动功率为1 400 W的ZL105合金的磨损量为0.097 8 mg,与未进行超声振动处理的合金相比降低了29.18%。

参考文献:

- [1] 何芳,庄林忠,何国元,等.汽车轮毂用A356铝合金合金化的研究进展[J].铸造,2021,70(4):431-437.
- [2] 郭红丽,李勇.半固态挤压铸造下稀土Y强化机械零件用ZL105铝合金的制备与性能[J].材料与冶金学报,2022,21(6):442-447.
- [3] 陈晖,周焯,曾敏,等.混合稀土(Pr+Ce)变质处理ZL105铝合金摩擦磨损性能研究[J].稀有金属与硬质合金,2022,50(4):71-76.
- [4] 张莉,李晓谦,关绍康,等.超声处理对航空航天用Al-6.2Cu-0.36Mn合金组织的影响[J].特种铸造及有色合金,2020,40(11):1199-1203.
- [5] MAO Feng, YAN Guangyuan, XUAN Zhenjing, et al. Effect of Eu addition on the microstructures and mechanical properties of A356 aluminum alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 650: 896-906.
- [6] ZOU Yongcheng, YAN Hong, YU Baobiao, et al. Effect of rare earth Yb on microstructure and corrosion resistance of ADC12 aluminum alloy [J]. Intermetallics, 2019, 110: 106487.
- [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] 李便霞,曾凡娇.超声功率对AlSi7MgCu2合金组织及力学性能的影响[J].铸造,2022,71(9):1139-1143.
- [9] 杜安娜,刘岩,贾征,等.超声处理对Al-5Si合金除气效率的影响[J].铸造,2020,69(10):1072-1076.
- [10] 陈杼鑫,路林,贾征,等.超声处理对Al-2Cu合金凝固组织及熔体除气效果的影响[J].轻金属,2020,10:54-57.
- [11] 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,2010,18(6):838-842.
- [12] 张黎,陈乐平,周全,等.超声熔体处理对ZA27合金组织和力学性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2018,38(1):78-81.
- [13] 王冲,蒋日鹏,李瑞卿,等.超声处理对重熔半连续ZL205铝合金组织与性能影响[J].特种铸造及有色合金,2020,40(9):939-945.
- [14] 郭永春,郭松松,夏峰,等.超声处理对Al-Si活塞合金组织和力学性能的影响[J].热加工工艺,2017,46(7):101-104.

- [15] FENG H K, YU S R, LI Y L et al. Effect of ultrasonic treatment on microstructures of hypereutectic Al-Si alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 208 (1) : 330-335.
- [16] 樊文欣, 郭佩剑, 原霞, 等. 载荷和转速对铜合金材料摩擦磨损性能的影响 [J]. 摩擦学学报, 2021, 41 (6) : 821-832.
- [17] 冯昌青. Mg97Zn1Y2合金高温磨损行为研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [18] 张波, 徐冬, 张书维, 等. 稀土元素La变质Al-5Si合金耐磨性能研究 [J]. 轻金属, 2022 (9) : 48-52.
- [19] 李瑶辉, 李克, 尹文来, 等. 快速凝固Mg-Si-RE (Ce, La) 镁合金的微观组织及其摩擦磨损行为 [J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51 (1) : 266-272.

Effect of Melt Ultrasonic Vibration on Microstructure and Properties of ZL105 Alloy

LIU Jun-wei, BAI Xiang

(Jiangsu College of Safety Technology, Xuzhou 221000, Jiangsu, China)

Abstract:

ZL105 was treated by melt ultrasonic vibration, and the wear test was carried out on a ball-disc friction and wear tester. The effect of different ultrasonic power on the friction and wear properties of the alloy was studied. The microhardness and tensile strength of the alloy were tested by microhardness tester and electronic universal tensile testing machine. The results showed that ultrasonic vibration could effectively refine the grain size of α -Al phase and greatly reduce the secondary dendrite arm spacing. Moreover, ultrasonic vibration also had a significant effect on the refinement of eutectic Si phase. The average aspect ratio of Si phase decreases from 5.5 without ultrasonic vibration to 1.3 after ultrasonic vibration. When the ultrasonic vibration power reached 1400W, the microhardness, tensile strength and elongation of the alloy reached the peak values of HV 103.25, 229.73 MPa and 4.9 %, respectively. In addition, the friction and wear properties of the alloy also reached the optimum, the wear and friction coefficient of the alloy were 0.097 8 mg and 0.52, respectively, which were 19.18% and 12.31% lower than those of the ZL105 alloy without ultrasonic vibration treatment.

Key words:

ZL105 alloy; ultrasonic vibration; microstructure; tensile properties; hardness; friction and wear properties