DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.08.005

双超声探头处理对7116铝合金DC铸造大铸锭凝固组织的影响

贾　征,喻　兵,付　丽
(沈阳大学 机械工程学院,辽宁 沈阳 110044)

摘　要:对7116铝合金进行了双超声处理,对比研究了不同部位的凝固组织,并分析了超声细化的机理。结果表明,铸锭整体细化效果明显,凝固组织比较分散、细小,不同部位的凝固组织均比单一超声细化效果更优。与未经超声处理的铸锭组织相比,铸锭边缘、1/4直径处和心部的晶粒尺寸分别下降了63.4%、76.3%和55.5%。

关键词:超声处理;7116铝合金;晶粒细化;DC铸造
中图分类号:TG244　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)08-0672-04

Effect of Dual Ultrasonic Probe Treatment on Solidification Structure for Large 7116 Aluminum Ingot in DC Casting

JIA Zheng, YU Bing, FU Li
(School of Mechanical Engineering, Shenyang University, Shenyang 110044, China)

Abstract: Double ultrasonic treatment of 7116 aluminum alloy was carried out. The solidification microstructure of different parts was compared and the mechanism of ultrasonic refining was analyzed. The results show that the overall refining effect of the ingot is obvious, the solidification microstructure is more dispersed and fine, and the solidification microstructure of different parts is better than that of single ultrasonic refining. Compared with the ingot without ultrasonic treatment, the grain size at the edge, 1/4 diameter and center of the ingot decrease by 63.4%, 76.3% and 55.5%, respectively.

Key words: ultrasonic treatment; 7116 aluminum alloy; grain refinement; DC casting

目前铝合金因其优异的物理化学性能被广泛用于兵器、交通以及航天航空等领域,但铝合金在成形之前,通常需要考虑如何细化其凝固组织和降低晶粒尺寸[1-2]。有研究发现超声处理对DC(Direct Chill 直接激冷)铸造铝合金锭坯的微观组织具有一定的细化作用,同时超声波也因其对环境的无害性和改善工人劳动环境等优势越来越普遍的应用于各行业各领域之中[3-4]。将金属熔体置于超声场中,熔体在作为超声传递介质的过程中伴随着超声波的传播反复激荡[5-9],使得晶粒在超声作用下相互碰撞破碎为细小晶粒,因此可以将柱状晶转变成细小的等轴晶。但由于单功率所产生的超声场有限,对金属熔体的影响不足[10-13]。因此,本文作者通过使用双超声探头处理7116铝合金,分析了该工艺对DC铸造大铸锭凝固组织的影响。

1　实验方法

1.1　实验装置示意图

实验所选7116合金的化学成分列于表1。使用的设备有蓄热式熔炼炉、最大输出功率分别为2 000 W和3 000 W的超声波发生器(超声探头为表面涂抹了氧化钛粉的TC4钛合金)、电子秒表及浇注勺。图1为所采用的实验装置示意图。

表1 7116合金的化学成分 w(%)

Tab.1 Chemical composition of 7116 alloy

Zn	Mg	Cu	Zr
5.00~5.20	1.20~1.40	0.60~0.75	0.15~0.17
Fe	Ti	Si	V
0.14~0.17	0.03~0.05	<0.10	0.03~0.05

1.2　实验过程

待熔化后的铝液进入结晶器稳定后开始试加超声场,试加方式如图1所示,实验采用蓄热式熔炼炉、最大输出功率分别为2 000 W和3 000 W的超声波发生器,超声探头需置于铝合金熔体液面下100 mm处,然后超声处理20 min。实验完成后,在铸锭上的边部、中心部位和1/4直径处取样,具体实

收稿日期:2021-04-05
基金项目:辽宁省自然科学基金指导计划项目(2019-ZD-0561和2019-ZD-0544)
作者简介:贾　征(1982—),辽宁沈阳人,副教授,博士.研究方向:铝合金成形工艺.电话:13840574164,Email:jz140@163.com

验流程图如图2所示。

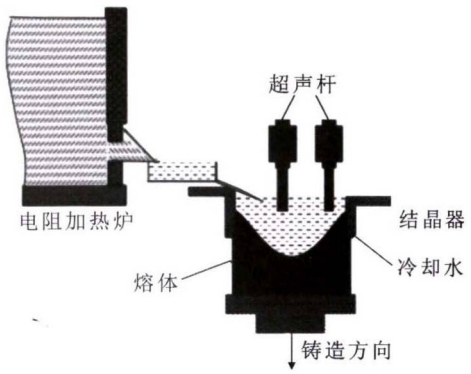


图1 实验装置图

Fig. 1 Diagram of experimental device

2　实验结果及分析

2.1　DC铸造经2 000 W超声处理的7116合金组织

将2 000 W超声探头置于结晶器的熔体液面以下100 mm处，处理温度为720 ℃，得到的微观组织如图3，还给出了未经2 000 W的超声处理的组织。可以看出，未经2 000 W的超声处理的组织，晶粒尺寸基本在365 μm左右；1/4直径部位和中心部位晶粒也较为粗大，但在使用2 000 W的超声处理后，会发现铸锭各部位的凝固组织均有所细化，但细化效果有限，只能观察到部分细小晶粒，其余部分仍然是粗晶。

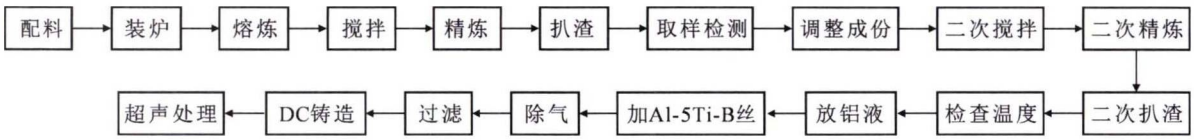
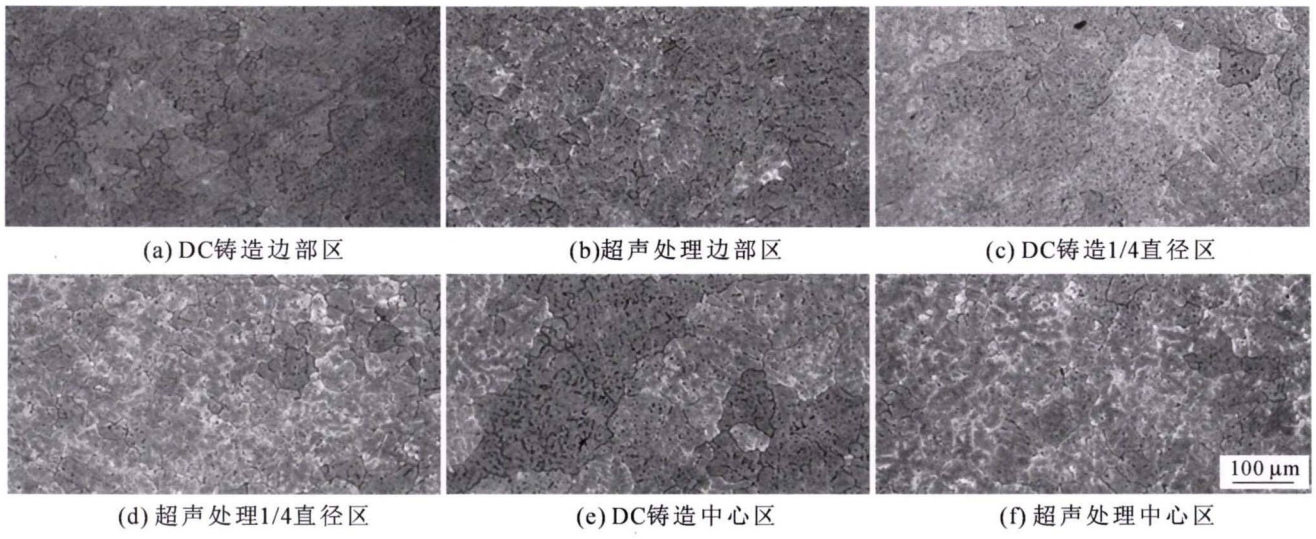


图2 工艺流程图

Fig. 2 Process flow chart



(a) DC铸造边部区　(b)超声处理边部区　(c) DC铸造1/4直径区

(d) 超声处理1/4直径区　(e) DC铸造中心区　(f) 超声处理中心区

图3 DC铸造的7116合金不同位置超声处理前后的组织(2 000 W)

Fig. 3 Microstructure of DC cast 7116 alloy at different locations before and after ultrasonic treatment (2 000 W)

2.2　DC铸造经3 000 W超声处理的7116合金组织

将3 000 W超声探头置于结晶器的边部熔体液面以下的100 mm处，处理温度为720 ℃，得到的微观组织如图4。

在使用3 000 W超声处理后，发现大铸锭的各区域凝固组织都有一定程度的细化，但与2 000 W超声处理的细化效果相差不大，因此单纯地增大超声功率也不一定可以细化晶粒。

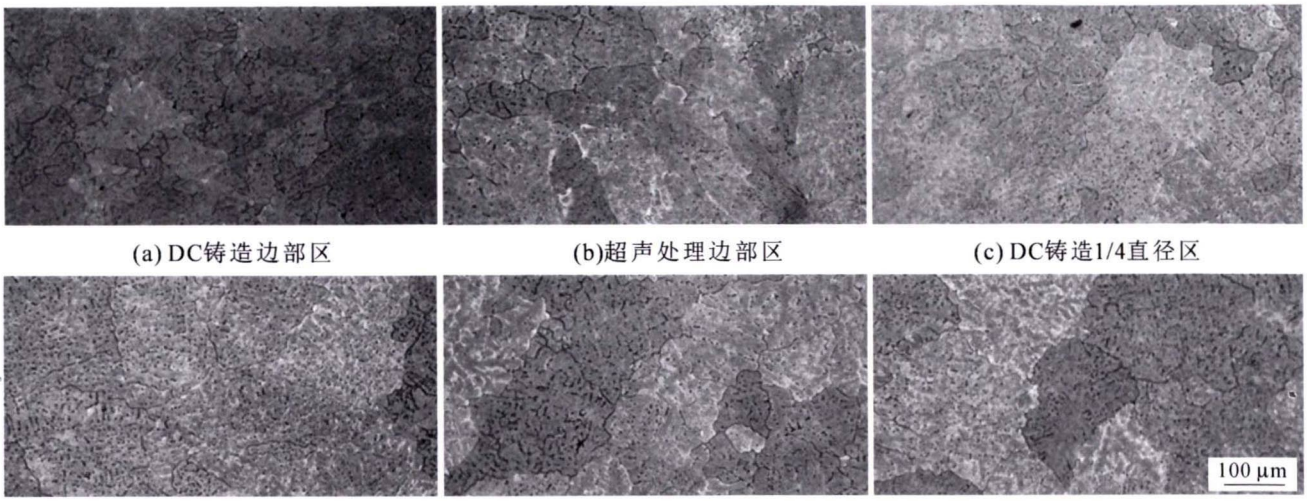
2.3　DC铸造经2 000 W+3 000 W复合超声处理的7116合金组织

将2 000 W和3 000 W的双超声探头置于结晶器的边部熔体液面以下的100 mm处，处理温度为720 ℃，得到的微观组织如图5。

在使用2 000 W+3 000 W双超声处理后，各个部位上原本粗大的凝固组织均有了很大程度的细化，细小的晶粒密度增加，在铸锭边部可以观察到细小晶粒和粗大晶粒的混合组织，而在1/4直径处也观察不到明显的粗大晶粒。为了对比单一超声与复合超声的细化效果，图6统计了单一与复合超声晶粒尺寸大小变化情况。

可以看出，铸锭在经过复合超声处理后其晶粒大小由半径处向边缘部分逐渐减小但并不连续，在1/4直径处晶粒尺寸最小。测量后得出铸锭中心部

位晶粒从 210 μm 降至 88 μm，下降了 55.5%；1/4 直径处晶粒也得到细化，由 310 μm 降至 66 μm，降低了 76.3%，此处细化效果达到最佳；铸锭边部处地晶粒从 400 μm 降至 140 μm，下降了 63.4%。

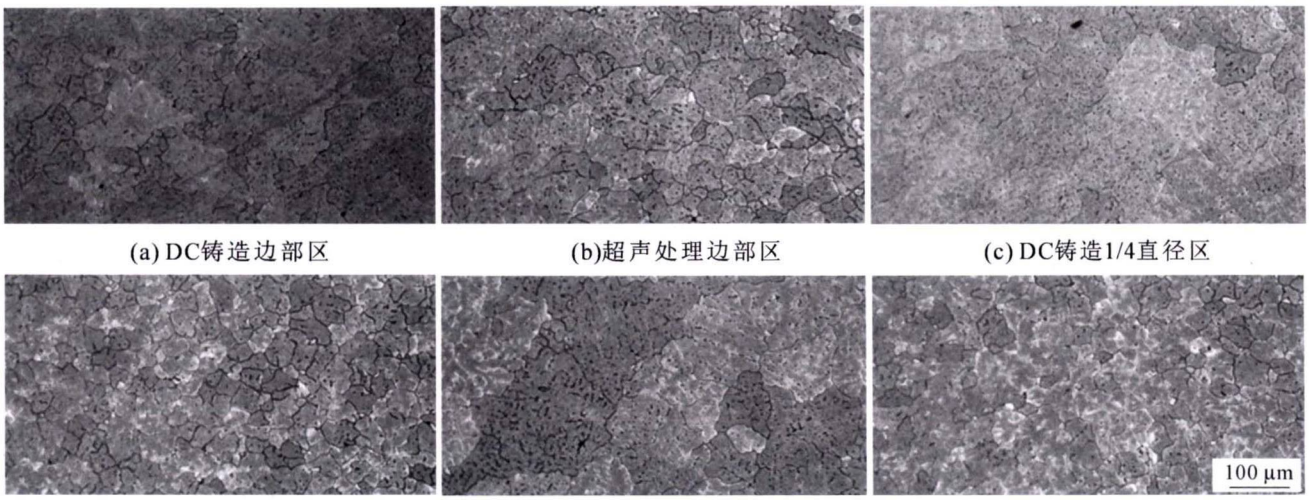


(a) DC铸造边部区　(b)超声处理边部区　(c) DC铸造1/4直径区

(d) 超声处理1/4直径区　(e) DC铸造中心区　(f) 超声处理中心区

图 4 DC 铸造 7116 合金不同位置超声处理前后的组织(3 000 W)

Fig. 4 Microstructure of DC cast 7116 alloy at different locations before and after ultrasonic treatment (3 000 W)



(a) DC铸造边部区　(b)超声处理边部区　(c) DC铸造1/4直径区

(d) 超声处理1/4直径区　(e) DC铸造中心区　(f) 超声处理中心区

图 5 DC 铸造 7116 合金不同位置超声处理前后的组织(2 000 W + 3 000 W)

Fig. 5 Microstructure of DC cast 7116 alloy at different locations before and after ultrasonic treatment (2 000 W + 3 000 W)

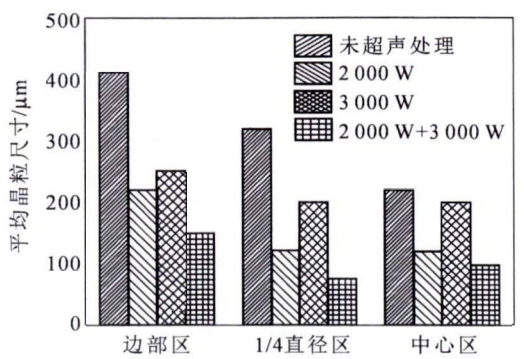


图 6 超声处理 7116 合金后的晶粒尺寸

Fig. 6 Size of grain of 7116 alloy by ultrasonic treatment

2.4　双超声探头细化的机理分析

为了分析双超声处理的细化机理，在观察显微组织后，引入了超声场细化晶粒的示意图[14]，如图 7 所示。当将超声波处理 7116 合金熔体时，产生包含正负周期的交变超声场，使熔体中产生的空化气泡可以在负周期扩大，在正周期中收缩或塌陷[15-16]。熔体经超声处理后晶粒细化的原因有两个：首先，空化气泡的生长可以吸收熔体中的热量，然后在气泡界面受到冷却影响而形核[17]。随后空化气泡的破裂产生巨大能量粉碎熔体中的初始晶核和枝晶，导致晶核数量增加，晶粒尺寸变小。并且产

生的声流是一种由于声压梯度引起的液体流动，也有利于晶粒细化[18-19]。而超声产生的液相宏观流动效应表现为液体内部的普遍回流，可以将非均匀形核和枝晶破碎引起的大量核输运到整个铝合金熔体中[20-23]。而在双超声探头处理中，同时引入2 000 W和3 000 W两个超声场，即每个超声系统都能产生声流效应，强力的声流效应使铝合金的凝固组织细化更加均匀。

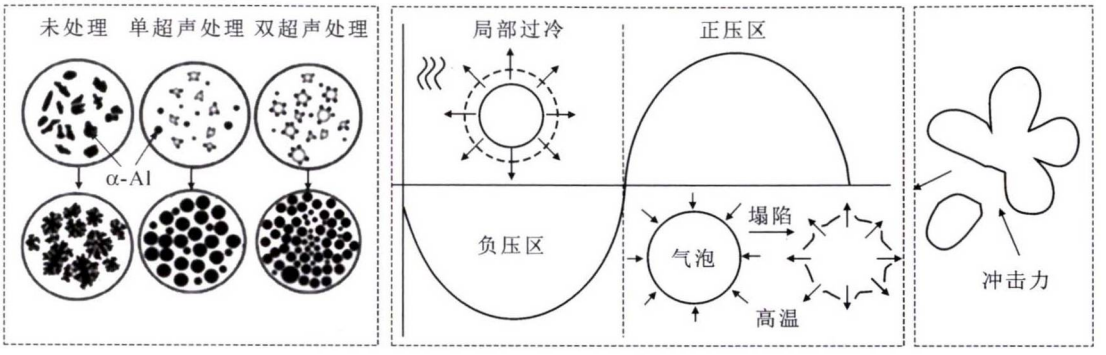


图7 超声场晶粒细化示意图

Fig. 7 Schematic diagram of grain refinement in the ultrasonic field

3 结论

（1）经2 000 W +3 000 W双超声处理后，各个部位上原本粗大的晶粒均有了很大程度的细化，比单一超声细化效果要好的多。

（2）经2 000 W +3 000 W双超声处理后，铸锭的边部晶粒尺寸下降了63.4%；而在1/4直径部位下降了76.3%；在铸锭中心部位则下降了55.5%。双超声处理使铸锭各部位细化效果较好，组织也更加均匀。

参考文献：

[1] 张海涛，何 昊，尹 纲，等. 合金元素在铝合金汽车结构件铸件的研究现状[J]. 铸造技术，2021，42(2)：153-158.

[2] 马明亮，蔡之勇，郭 纯，等. 铝合金CMT技术增材制造研究进展[J]. 铸造技术，2020，41(11)：1088-1090.

[3] ABDEL-REIHIM M，REIT W. Practical Applications for Solidification of Metals and Alloys Under Ultrasonic Vibrations[J]. Metallbericht，1984，38(12)：1156-1158.

[4] 张辉，孙彦华，岳有成，等. 再生铝合金熔体净化技术的发展现状[J]. 铸造技术，2020，41(6)：573-575.

[5] JIA Z，ZHANG Z Q. Effect of ultrasonic melt treatment on degassing of Cu-6Zn-1Ca alloy[J]. China Foundry，2015，12(1)：15-19.

[6] 胡化文. 7055铝合金熔体超声处理与凝固研究[D]. 长沙：中南大学，2004.

[7] 范金辉，翟启杰. 物理场对金属凝固组织的影响[J]. 中国有色金属学报，2002(12)：12-17.

[8] ESKIN G I. Ultrasonic treatment of light alloy melts[M]. Amsterdam：Gordon and Breach Science Publishers，1998.

[9] ABRAMOV O V. Ultrasound in liquid and solid metals[M]. Boca Raton：CRC Press，1994.

[10] ZHANG L，LI X Q，LI R Q，et al. Effects of high-intensity ultrasound on the microstructures and mechanical properties of ultra-large 2219 Al alloy ingot[J]. Materials Science &amp；Engineering A，2019(763)：138-154.

[11] WANG F，IAKOVOS T，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)：66-76.

[12] CHEN X R，NING F K，HOU J，et al. Dual-frequency ultrasonic treatment on microstructure and mechanical properties of ZK60 magnesium alloy[J]. Ultrasonics sonochemistry，2018(40)：433-441.

[13] LIU Z L，LI R Q，JIANG R P，et al. Scalable Ultrasound-Assisted Casting of Ultra-large 2219 Al Alloy Ingots[J]. Metallurgical and Materials Transactions A，2019，50(3)：1146-1152.

[14] 高声远. AZ系镁合金铸态组织细化工艺与理论研究[D]. 东北大学，2011.

[15] JIA Z，ZHANG W M，YANG F，et al. Effect of ultrasonic melt treatment on degassing of Mg-6Zn-1Ca alloy[J]. China Foundry，2015，12(1)：15-19.

[16] ZHANG Z T，YUE H Y，ZHANG J，et al. Effect of compound field on horizontal continuous casting of Al-1wt.% Si alloy[J]. China Foundry，2015，12(2)：123-128.

[17] MIAO L，LU Y P，ZHANG Y B，et al. Effect of ultrasonic treatment and Sr addition on microstructure of Al-20% Si alloy[J]. China Foundry，2013，10(4)：213-216.

[18] RAMIREZ A，QIAN M，DAVIS B，et al. Potency of high-intensity ultrasonic treatment for grain refinement of magnesium alloys，Scr. Mater. 2008(59)：19-22.

[19] JIAN X，XU H，MEEK T T，HAN Q. Effect of power ultrasound on solidification of aluminum A356 alloy[J]. Materials Letters，2004，59(2)：190-193.

[20] MA L Q，CHEN F，SHU G J. Preparation of fine particulate reinforced metal matrix composites by high intensity ultrasonic treatment[J]. Journal of Materials Science Letters，2004，14(9)：649-650.

[21] XI X Y，CEGLA F B ，LOWE M，et al. Study on the bubble transport mechanism in an acoustic standing wave field[J]. Ultrasonics，2011，51(8)：1014-1025.

[22] MADELIN G，GRUCKER D，FRANCONI J M，et al. Magnetic resonance imaging of acoustic streaming：Absorption coefficient and acoustic field shape estimation[J]. Ultrasonics，2006，44(3)：272-278.

[23] FRENKEL V，GURKA R，LIBERZON A，et al. Preliminary investigations of ultrasound induced acoustic streaming using particle image velocimetry[J]. Ultrasonics，2001，39(3)：153-156.