● 试验研究 Experimental Research ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.08.001

高强超声对 Al–2Mg 合金凝固组织及除气的影响

史宏林,黄松林,贾 征,孙永强,苏 鑫
(沈阳大学 机械工程学院,辽宁 沈阳 110044)

摘 要:研究了高强超声处理对 Al-2Mg 凝固组织及除气的影响。结果表明,应用超声处理可达到很好的细化和除气效果,2 000 W 超声处理 30 s 的细化效果最好,铸锭断面等轴晶最多;处理 90 s 的除气效果最好,铸锭密度和除气率分别为 2.624 4 g·cm^{-3} 和 51.9%。超声的高频振动产生空化效应持续时间越久,除气效果越明显。

关键词:高强超声;Al-2Mg 合金;密度;除气率;空化效应

中图分类号:TG146.2; TG113 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2019)08-0755-04

Effect of High–intensity Ultrasonic on Solidification Structure and Degassing of Al–2Mg Alloy

SHI Honglin, HUANG Songlin, JIA Zheng, SUN Yongqiang, SU Xin
(School of Mechanical Engineering, Shenyang University, Shenyang 110044, China)

Abstract: The effect of high-intensity ultrasonic treatment on solidification structure and degassing of Al-2Mg alloy was investigated. The results show that ultrasonic treatment could achieve good refining and degassing effect, the best refining effect is achieved at 30 s with ultrasonic treatment at 2 000 W, and the most isometric crystals are found in the ingot section. The best degassing effect is obtained when treated with 90 s, the ingot density and degassing rate are 2.624 4 g·cm^{-3} and 51.9%, respectively. Ultrasonic cavitation effect created by the high frequency vibration of the longer duration, degassing effect is more apparent.

Key words: high-intensity ultrasonic; Al-2Mg alloy; density; degassing efficiency; cavitation effect

利用高能超声波处理纯铝或铝合金熔体是一种安全环保的新技术。在金属或合金的凝固过程中施加超声波振动可以有效地改善其结晶组织、提高力学性能[1-4]。进入 21 世纪,由于人们环境保护、资源再利用等意识的提高,绿色、无污染的超声波处理技术再次受到了人们的高度关注与期待[5-7]。高能超声波具有独特的声学效果,在金属凝固过程中,如果施加超声波振动,铸锭的凝固组织就会从粗大的柱状晶变成均匀细小的等轴晶,同时铸锭的宏观及微观偏析也得到了改善[8-10]。可是,对于超声波处理的铸锭,在获得全部等轴晶的同时,往往在铸锭内部仍然观察到气孔的存在,这样一来,就使材料的力学性能大为降低。无气孔和缩孔的高质量金属的生产在冶金、铸造领域,是非常重要的问题。在超声波振动处理的铸锭中,如何减少和防止气孔的形成呢?目前,对这类问题的研究并不多见。

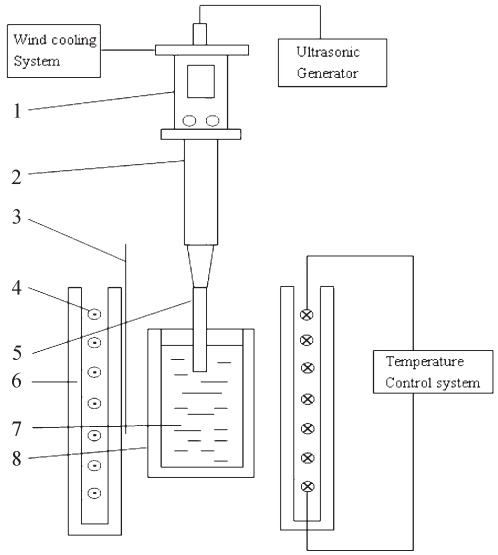
对于铝合金熔体来说,传统的除气方法有真空除气法、吹入惰性气体法、加入固体除气剂法和稀土除气法等。近年来,由于超声波除气作为环保经济的方法,已经得到了人们的关注,前苏联曾经报道过有关超声波除气的内容[11,12];最近,美国的橡树岭国家实验室,也就大气湿度、金属熔体温度和熔体体积等因素对超声波除气的影响进行了实验研究[13,14]。但是,总体来看,利用超声除气的报道还不是很多,研究内容也较少。因此,本文以 Al-2Mg 合金为研究对象,利用高强超声对其熔体进行处理,最后讨论了其除气及细化的机理。

1 实验方法

1.1 超声波处理装置

金属超声凝固装置如图 1。该装置由超声波发生器(最大输出功率 2 000 W、频率 20 kHz)、压电陶瓷换能器、表面喷涂了氧化钛及氧化铝的 TC4 钛合金探头、粘土–石墨坩埚、自动测温装置、探头移动机

收稿日期:2019-05-28
基金项目:辽宁省自然科学基金(20170520310)
作者简介:史宏林(1992-),辽宁铁岭人,硕士生.研究方向:铝合金成形工艺.电话:15541565636,
E-mail:842735422@qq.com
通讯作者:贾 征(1982-),辽宁沈阳人,讲师,博士后.研究方向:铝合金成形工艺.电话:024-62268134,
E-mail:jz140@163.com



1- 超声波传感器；2- 锥；3- 热电偶；4- 电阻加热器；5- 超声波散热器
6- 陶瓷管；7-Al-2Mg 合金熔体；8- 坩埚

图 1 超声处理实验布置示意图
Fig.1 Schematic of experiment arrangement of ultrasonic treatment

构等组成。

1.2 实验过程

实验所用 Al-2Mg 合金采用 99.7%的工业纯铝与 99.9%工业纯镁熔配而成，熔化采用井式电阻炉，熔化过程中对熔化后的熔体进行 3 次充分地搅拌，浇注成小铸锭后切割成小块备用。将备好的小铝块放入一号粘土–石墨坩埚中进行重新熔化，当熔体温度达到 760 ℃时进行超声波处理。

超声波处理时，先让超声波探头振动，然后从上方浸入液面下 5 mm，对熔体施加 30、60、90 及 120 s 的超声波振动，所使用的超声功率为 2 000 W，为了对比，也同时制备出未经超声处理的铸锭，熔体自然凝固后得到铸锭。

利用阿基米德原理测定其所得铸锭的密度，并将凝固后的 Al-2Mg 铸锭沿着纵向一分为二，研磨并抛光，分别观察宏观组织和微观组织。

2 实验结果与讨论

2.1 宏观组织的观察

图 2 为高强超声处理不同时间后的凝固变化情况。从图 2 看出，未经过超声处理的铸锭，铸锭由长条的柱状晶和较粗大的等轴晶组成，有一些肉眼可见的小气孔，如图 2(a)所示；而经过 30 s 超声处理后，铸锭可见气孔明显减少，且凝固组织大幅度细化，除了铸锭上部之外，其余均为均匀细小的等轴晶，如图 2(b)所示；当超声处理达到 60 s 时，凝固组织有所粗化，等轴晶有所长大，如图 2(c)所示；当超声处理时间进一步达到 90 s，铸锭的凝固组织变化不是很明显，如图 2(e)所示；当超声时间施加为 120 s 时，凝固组织很粗大，为粗大的等轴晶，出现这种现象的原因考虑是由于随着处理时间的延长，超声施加导致较大的热效应造成晶核重熔导致。

2.2 微观组织的观察

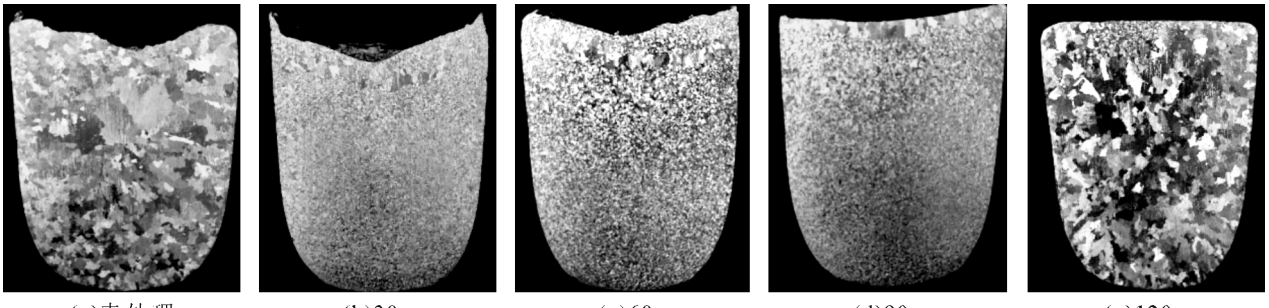
为了进一步说明超声处理对铸锭凝固组织的影响，图 3 给出了经超声处理后微观组织变化情况。从图 3 看出，未经过超声处理的铸锭，凝固组织比较粗大，均为发达的树枝晶，并且在枝晶间存在很多气孔，这种气孔在铸锭中随处可见，如图 3(a)所示；而经过 30 s 超声处理后，铸锭的气孔减少，且凝固组织得到了很好的细化，如图 3(b)所示；当超声处理达到 60 s 和 90 s 时，凝固组织没有进一步细化，但发现存在的气孔逐渐减少，且气孔尺寸也逐渐减少，如图 3(c)及 3(d)所示；当超声处理时间进一步达到 120 s 时，铸锭的凝固组织又出现了发达的树枝晶，枝晶间也出现了微孔，数量也有所增多，如图 3(e)所示。

2.3 不同超声处理时间对熔体除气的影响

为通过密度来表征除氢效果，将除气率 η 定义如下[15]：

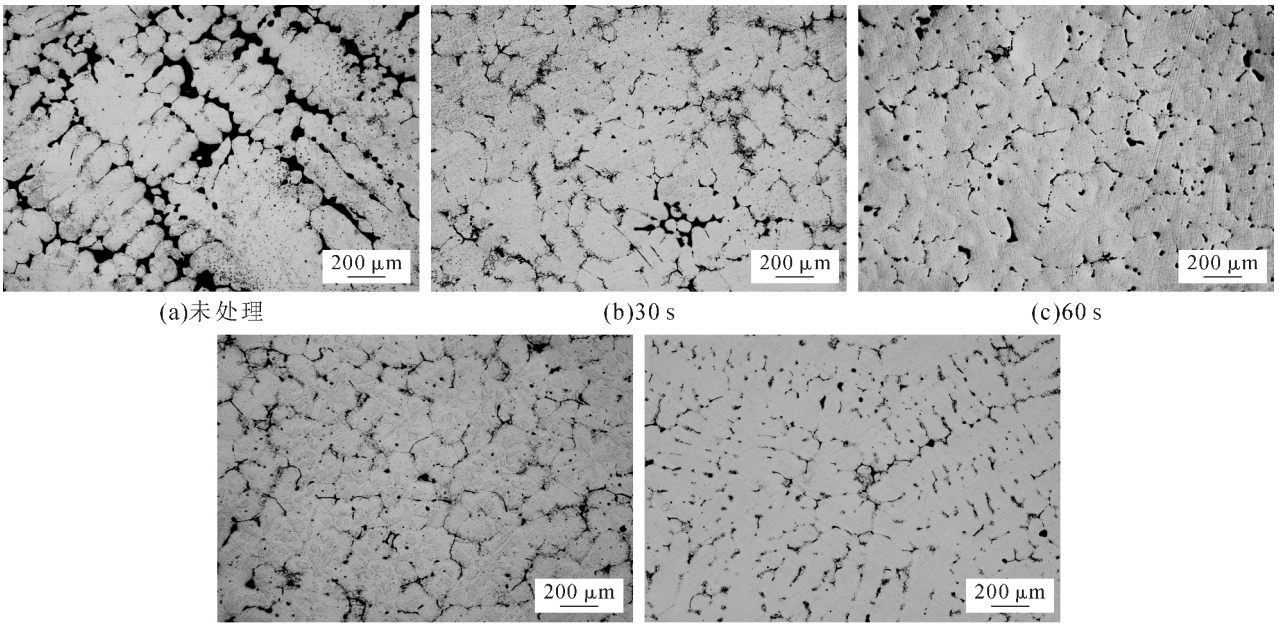
$$\eta=\frac{\rho_a-\rho_0}{\rho_t-\rho_0} \tag{1}$$

式中，ρ_0 未除氢处理的铸锭密度，g·cm^{-3}；ρ_a 经除氢处



(a)未处理　(b)30 s　(c)60 s　(d)90 s　(e)120 s

图 2 超声处理时间对 Al-2Mg 合金铸锭凝固组织影响
Fig.2 Effect of ultrasonic treating time on solidification structure of Al-2Mgalloy



(a)未处理　(b)30 s　(c)60 s

(d)90 s　(e)120 s

图 3　超声处理时间对 Al-2Mg 合金铸锭显微组织的影响

Fig.3　Effect of ultrasonic treating time on microstructure of Al-2Mg alloy

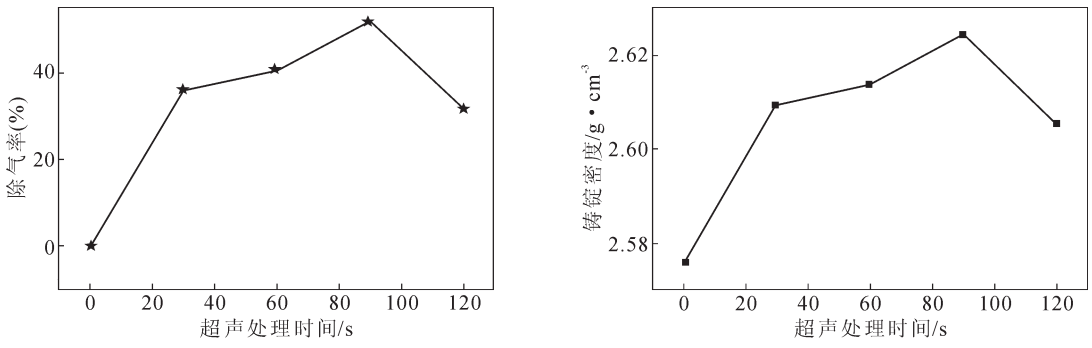
理的铸锭密度，$g\cdot cm^{-3}$；ρ_t 合金的理论密度，Al-2Mg 合金理论密度为 2.669 4 $g\cdot cm^{-3}$。

图 4 为超声处理时间对 Al-2Mg 合金铸锭密度及除气率的影响，从图 4 看出，铸锭密度和除气率的变化是一致的，即未施加超声时，铸锭的密度非常低，仅为 2.575 9 $g\cdot cm^{-3}$，而施加一定时间的超声后，铸锭的密度明显提高，处理 90 s 时铸锭的密度和除气率最高，分别为 2.624 4 $g\cdot cm^{-3}$ 和 51.9%。但是当超声时间过长时，铸锭的密度和除气率有下降的趋势，不过从组织观察来看，超声处理 30 s 时铸锭凝固组织非常细小，但是此时铸锭的密度和除气率不是最高。

2.4　超声处理细化及除气的机理分析

对于铝合金来说，熔体中含有过量的氢，大部分的氢溶解在铝液中，还有一部分吸附在夹杂物上。当高强超声导入到熔体中时，在熔体内部将产生空化气泡。空化气泡经历了 3 个不同的阶段，第一，在空化核基础上空化气泡形成过程和空化气泡的长大过程；第二，很多个空化气泡聚集长成大气泡的过程；第三，大气泡漂浮至熔体从表面逸出的过程。所以，铝熔体中的氢原子将通过对流和扩散可迁移到空化泡的气–液界面，此后氢原子由溶解态转变为吸附态，气–液界面吸附的氢原子之间彼此相互作用，结合为氢分子，氢分子从气–液界面脱附，扩散进入空化泡，使其长成大的气泡，当其长大至一定尺寸时，可上浮至液面而消失。此外在超声波的声流作用下，微小气泡随即运动，合并的机会很多，最终可以克服液流的限制而上浮至液面，从而带走了熔体中的氢，超声熔体除气如图 5。

在本实验中，由于熔体中有过量的氢，不经过处理后大量的气泡会聚集在熔体中，来不及逃逸的气泡最终形成了气孔留在铸锭中导致铸锭密度很低，甚至有肉眼可见的气孔，经过一定时间的超声处理后，根据上面的分析，由于超声的高频振动产生空化



(a)除气率　(b)铸锭密度

图 4　超声处理时间对 Al-2Mg 合金铸锭密度及除气率的影响

Fig.4　Effect of ultrasonic treating time on density of ingot and degassing efficiency of Al-2Mg alloy

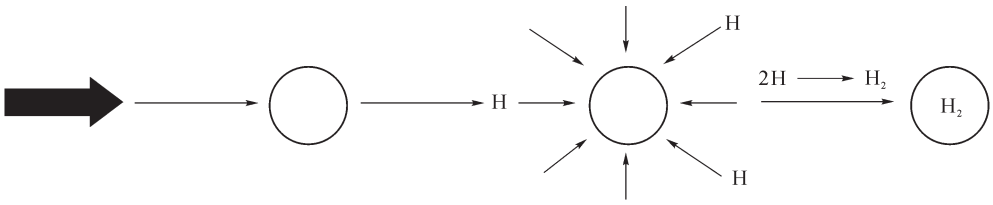


图 5 超声除气示意图

Fig.5 The schematic of ultrasonic degassing

效应而具有良好的除气效果，处理时间越长，空化效应持续时间越久从而导致除气效果明显；但是进一步加大超声处理时间时，因为熔体的温度在不断降低，气体的逸出越来越困难，加之超声产生的空化气泡也会由于液体的粘度增大而扩散困难造成除气效果有所下降。

3 结论

（1）超声处理 Al-2Mg **熔体具有良好的细化效果。本实验中，**2 000 W **超声处理** 30 s **时超声的细化效果良好，铸锭断面等轴晶最多。**

（2）超声处理 Al-2Mg **熔体具有良好除气效果，本实验中，**2 000 W **超声处理** 90 s **时铸锭的密度最大，除气率也最高，分别为** 2.624 4 g·cm^{-3} **和** 51.9%。

参考文献：

[1] **张志强，乐启炽，崔建忠. 高强超声对** Mg-Ca **合金凝固组织的影响**[J]. **稀有金属材料与工程**, 2008, 37(3): 436-4390.

[2] **张志强. 超声场及电磁-超声组合场作用下镁合金凝固组织与性能研究**[D]. **沈阳：东北大学**, 2009.

[3] Jia Zheng, Zhang Zhiqiang. Effect of ultrasonic melt treatment on degassing of Mg-6Zn-1Ca alloy [J], China Foundry, 2015, 12(1): 15-19.

[4] Xuan Liu, Zhiqiang Zhang, Wenyi Hu, et al. Study on hydrogen removal of AZ91 alloys using ultrasonic argon degassing process[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015(26): 73-80.

[5] **刘轩**. AZ **系镁合金熔体变质与除气研究** [D]. **沈阳：东北大学**, 2016.

[6] **马新建，张永杰. 功率超声结合吹氩操作对钢液中夹杂物的去除效果**[J]. **世界钢铁**, 2010(3): 30-33.

[7] **李军文，由向群，付莹，等. 超声波共振度对铸锭内气孔生成的影响**[J]. **铸造技术**, 2008, 29(6): 790-792.

[8] **李晓谦，陈铭，赵世琏，等. 功率超声对** 7050 **铝合金除气净化的试验研究**[J]. **机械工程学报**, 2010, 46(18): 41-45.

[9] **姜佳佳**. AZ91 **镁合金熔体除氢工艺及其对组织与性能的影响**[D]. **沈阳：东北大学**, 2014.

[10] **李军文，付莹，桃野正. 超声波处理时间对铝合金铸锭内的气孔生成及细化的影响**[J]. **铸造技术**, 2006, 27(10): 1063-1066.

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

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

[13] Hanbing X, Qingyou H, Thomas T M. Effects of ultrasonic vibration on degassing of aluminum alloys [J]. Materials Science Engineering A, 2008, 473: 96-104.

[14] Xu H B, Meek T T, Han Q Y, et al. Effects of ultrasonic field and vacuum on degassing of molten aluminum alloy [J]. Materials Letters, 2007(61): 1246-1250.

[15] Li J W, Momono T, Yoshinori T, et al. Application of ultrasonic treating to degassing of metal ingots [J]. Materials Letters, 2008, 62: 4152-4154.

技术资料邮购

《铸造抗磨产品实用生产技术集》

《铸造抗磨产品实用生产技术集》本书由李德臣教授级高工编著。 共8章： 1、关于锰钢生产技术；2、球墨铸铁与蠕墨铸铁生产技术；3、抗磨产品生产技术；4、锤头生产技术；5、消失模、V法生产技术；6、典型铸件的生产技术；7、还原罐生产技术；8、关于企业管理。全书22万字。特快专递邮购价：98元。

邮购咨询：李巧凤　　电话/传真：029-83222071