

The Effect of Ultrasonic Treatment on the Microstructure and Properties of 5356 Aluminum Alloy

Yuwei Huang, Anmin Li, Xiaoshuo Fan

College of Material Science and Engineering, Guangxi University, Nanning Guangxi
Email: 303091098@qq.com, lamanny@126.com

Received: Mar. 19th, 2017; accepted: Mar. 28th, 2017; published: Mar. 31st, 2017

Abstract

Ultrasonic treatment was adopted in 5356 aluminum alloy in melt. The effects of ultrasonic treatment about temperature, power, time on the microstructures and properties of 5356 aluminum alloy were studied. The microstructures of 5356 aluminum alloy were researched by optical microscope, scanning electron microscope and energy disperse spectroscopy. The mechanical properties of 5356 aluminum alloy were tested by tension test and impact test. The results showed that the grain of 5356 aluminum alloy was refined significantly and the mechanical properties of 5356 aluminum alloy were enhanced with ultrasonic treatment. The effects of ultrasonic treatment and the properties of 5356 aluminum alloy were the best when ultrasonic treatment temperature is 660°C, the processing time is 2 - 3 min and the output power is 1300 W.

Keywords

5356 Aluminum Alloy, Ultrasonic Treatment, Grain Refining, Mechanical Properties

超声波处理对5356铝合金组织和性能的影响

黄宇炜, 李安敏, 范晓烁

广西大学材料科学与工程学院, 广西 南宁
Email: 303091098@qq.com, lamanny@126.com

收稿日期: 2017年3月19日; 录用日期: 2017年3月28日; 发布日期: 2017年3月31日

摘 要

在5356铝合金熔炼中采用超声波熔体净化处理技术, 研究超声波处理的温度、时间和功率对5356铝合

金组织和性能的影响。利用光学显微镜、扫描电子显微镜、能谱仪等研究5356铝合金的显微组织,采用拉伸和冲击实验法测试5356铝合金的力学性能。结果表明:超声波处理能够显著细化晶粒,提高力学性能;超声波处理温度为660℃,处理时间为2~3 min,输出功率为1300 W时,超声波处理效果最佳,5356铝合金组织最细化,力学性能最好。

关键词

5356铝合金, 超声波处理, 细化晶粒, 力学性能

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

5356 铝合金属于 5xxx 系变形铝合金,是一种非热处理强化型铝合金[1],具有适中的强度、较好的加工性能和耐腐蚀性,在动车车厢、铝制运动器材、化工设备、兵工装备、航空航运等行业广泛应用[2] [3] [4] [5] [6]。熔炼是 5356 铝合金生产的初始工艺,很大程度上决定着 5356 铝合金的质量。熔炼效果差会导致 5356 铝合金在后续加工过程中容易出现性能不佳,难以满足行业发展的需要[7]。这是由于 5356 铝合金熔炼过程中夹杂的氧化杂质含量高,晶粒细化效果不佳,枝晶偏析,使得铝合金的塑性和韧性大为降低[1] [8] [9]。超声波熔体净化处理技术是一种新型低成本的环保处理工艺,主要利用超声波在金属熔炼中形成的空化效应、声流效应、机械效应的综合作用来改变金属的除气、凝固过程,最终改善金属材料的熔体状态和凝固行为,使金属材料获得优良的组织 and 优越的性能[10]。本文将超声波熔体净化处理技术应用在 5356 铝合金熔炼过程中,研究在不同的温度、时间、功率条件下超声波处理对 5356 铝合金组织和性能的影响,分析 5356 铝合金的凝固行为和净化除气机理,掌握超声波处理对 5356 铝合金的影响规律,得到超声处理的最佳工艺参数,为超声波处理在铝合金焊丝生产中的应用提供依据。

2. 材料与方法

2.1. 实验材料

高纯铝锭(99.99%)、AlMg₂₀ 中间合金、AlMn₂₀ 中间合金、AlCr₂ 中间合金、AlTi₁₀ 中间合金、精炼剂 C₂Cl₆、覆盖剂(KCl, MgCl₂, CaCl₂, CaF₂)、耐火涂料(ZnO, Na₂SiO₃)。

2.2. 实验方法

采用两个坩埚电阻炉,选用石墨粘土坩埚。一个电阻炉温度设置为 700℃,坩埚随炉放置;另一个温度设置为超声处理温度,超声波发生器预热至超声处理温度,超声实验方案如表 1 所示。

按照 5356 铝合金化学成分[11](见表 2)配料,熔炼温度为 700℃~750℃。待精炼除气后用热电偶插入铝液,接触坩埚内壁测温,当温度即将降到超声处理温度时,放入另一个熔炼炉中,保温 5 min,进行超声处理,扒渣,浇入模具(Φ18 mm × 130 mm),再切割成 Φ18 mm × 10 mm。

采用 Zeiss 显微镜和 Phenom ProX 扫描电镜观察显微组织,通过 MIAPS-M 软件来分析晶粒度和多相面积的测定。

运用 X 射线衍射仪测定相的组成。测试参数为 Cu 靶,石墨单色器,2θ 为 20°~80°,扫描速度为 10°/min,

扫描电压 40 KV，电流为 50 mA。

按照室温拉伸标准(GB/T 228.1-2010)，加工拉伸试样如图 1 所示。在万能材料试验机进行实验，拉伸速度为 2 mm/min。

按照 GBT229-2007 金属材料夏比摆锤冲击试验方法的要求，设计冲击试样尺寸如图 2 所示。

3. 结果与分析

3.1. 温度对超声波处理效果的影响

5356 铝合金在不同温度超声波处理下的显微组织如图 3 所示。由于 5xxx 系铝合金耐腐蚀性能较好，Keller 试剂并不能很好的反映细化后的晶界，所以利用分析软件对显微组织进行二值化处理，增强了显微组织的分析性，并测定其晶粒度如表 3 所示。

Table 1. Ultrasonic treatment processing
表 1. 超声波处理方案

试验编号	处理温度/℃	处理时间/min	超声探头插入深度/mm	功率/W
0#	原始样(浇铸温度 710℃)			
1#	640	1	10	1300
2#	650			
3#	660			
4#	670			
5#	660	1	10	1300
6#		2		
7#		3		
8#		4		
9#	660	3	10	1100
10#				1300
11#				1500

Table 2. Composition of 5356 aluminum alloy
表 2. 5356 铝合金的化学成分

元素	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Be	Al
含量(wt%)	0.25	0.40	0.10	0.05~0.20	4.5~5.5	0.05~0.20	0.10	0.06~0.20	0.0003	余量

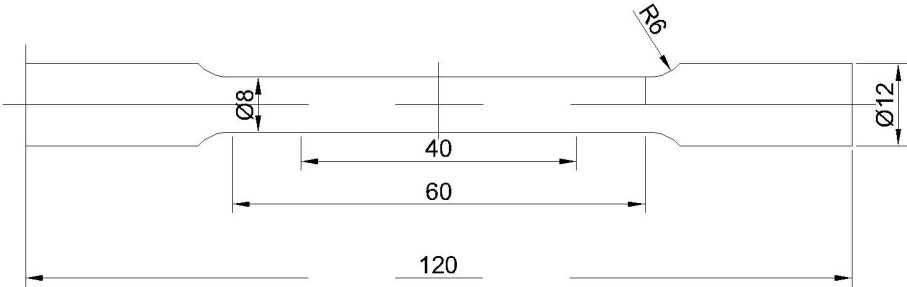


Figure 1. Schematic diagram of tensile specimen
图 1. 拉伸试样示意图

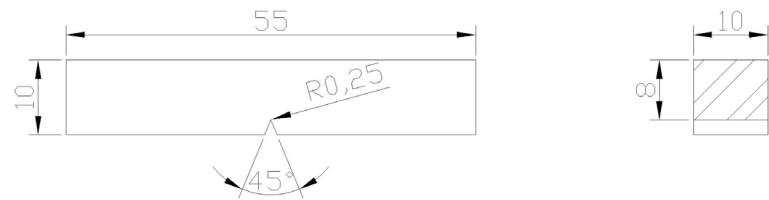


Figure 2. Schematic diagram of impact specimens
图 2. 冲击试样示意图

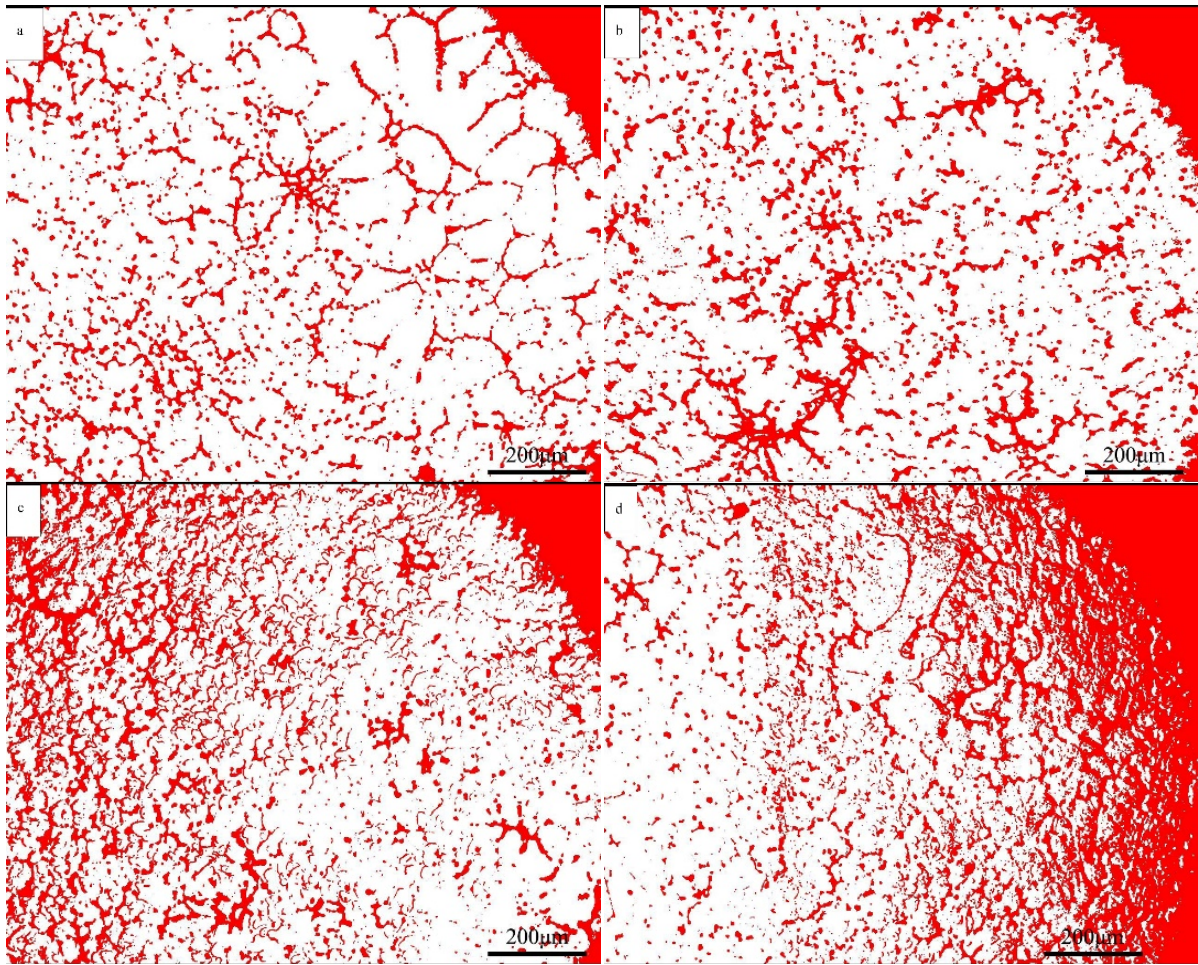


Figure 3. Microstructure of 5356 aluminum alloy after ultrasonic treatment at different temperatures(after binarization treatment); (a) 640°C; (b) 650°C; (c) 660°C; (d) 670°C
图 3. 5356 铝合金不同温度下超声波处理后的显微组织(经过二值化处理); (a) 640°C; (b) 650°C; (c) 660°C; (d) 670°C

Table 3. Grain size of 5356 aluminum alloy after ultrasonic treatment at different temperatures
表 3. 5356 铝合金不同温度超声波处理后的晶粒度

实验编号	平均晶粒度评级
1#	6.42
2#	7.03
3#	8.75
4#	8.13

结合图 3 和表 3 综合分析可知, 超声波处理温度在 640℃~660℃ 范围内, 随着温度的升高, 晶粒度逐渐增大, 晶粒细化效果越来越好, 组织由更均匀细小的等轴晶取代了大部分树枝晶。在 660℃ 晶粒最细化, 晶粒度为 8.75。但从 660℃ 升温到 670℃ 时, 晶粒度出现了下降的趋势, 树枝晶又重新出现在显微组织中, 晶粒细化效果变差。

5356 铝合金在不同温度超声波处理下的力学性能测试结果如图 4、表 4 所示。

结合图 4 和表 4 综合分析可知, 超声波处理温度在 640℃~660℃ 范围内, 随着温度的升高, 抗拉强度不断增大, 应变量也在不多增加。在 660℃ 时抗拉强度达到最大值 153.82 Mpa, 最大应变量为最大值 7.755%。但在 660℃~670℃ 范围内, 抗拉强度和最大应变量都开始减小。这种变化规律与图 3、表 3 表现出的规律相一致。

另一方面, 冲击功则在 640℃~670℃ 范围内都随着温度的升高而增大, 670℃ 时达到 26.4J。这是由于超声波处理后组织得到了显著的细化, 根据霍尔佩奇[12]公式, 晶粒尺寸减小后, 单位面积内晶界增多, 成为了位错运动的障碍, 提升了抗拉强度, 而晶粒的增多进一步提升了整体材料中位错滑移的空间, 进而提高了合金的塑性和韧性。

分别对超声波处理 640℃ 和 660℃ 的试样进行能谱分析, 所得结果如图 5、表 5 所示。超声波处理 640℃ 和 660℃ 的试样拉伸断口和冲击断口如图 6 所示。

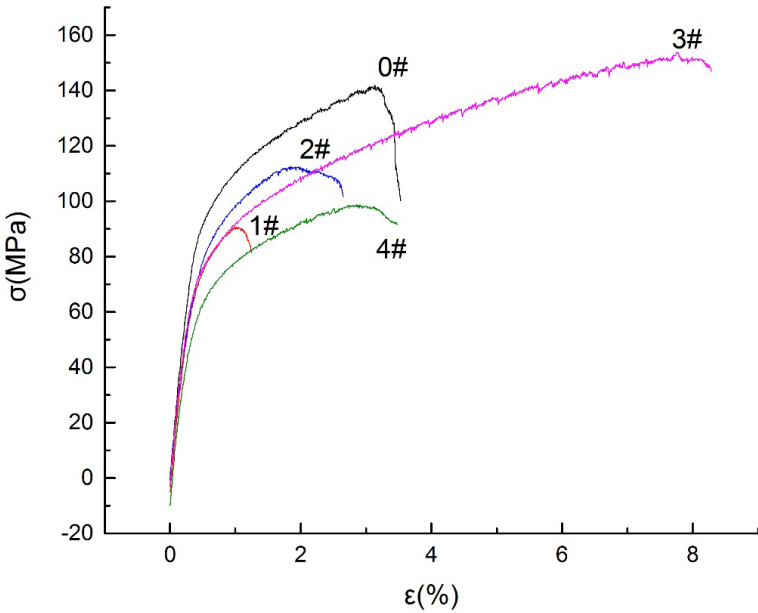


Figure 4. Stress-strain curves of 5356 aluminum alloy under ultrasonic treatment at different temperatures

图 4. 在不同温度下超声波处理下的 5356 铝合金的应力 - 应变曲线

Table 4. Mechanical properties of 5356 aluminum alloy under ultrasonic treatment at different temperatures

表 4. 在不同温度超声波处理下 5356 铝合金的力学性能

试样编号	最大应变值(%)	抗拉强度(Mpa)	冲击功(J)
1#	0.9915	90.681	6.2
2#	1.8350	112.586	13.2
3#	7.7550	153.828	26.2
4#	2.8550	98.858	26.4

Table 5. The contents of Mg in the grains after ultrasonic treatment at different temperatures
表 5. 不同温度下超声波处理后晶粒内外 Mg 的含量

试样 编号	Mg (Wt.%)			
	1	2	3	4
1#	3.4	5.8	6.4	4.0
3#	3.1	3.6	3.6	4.0

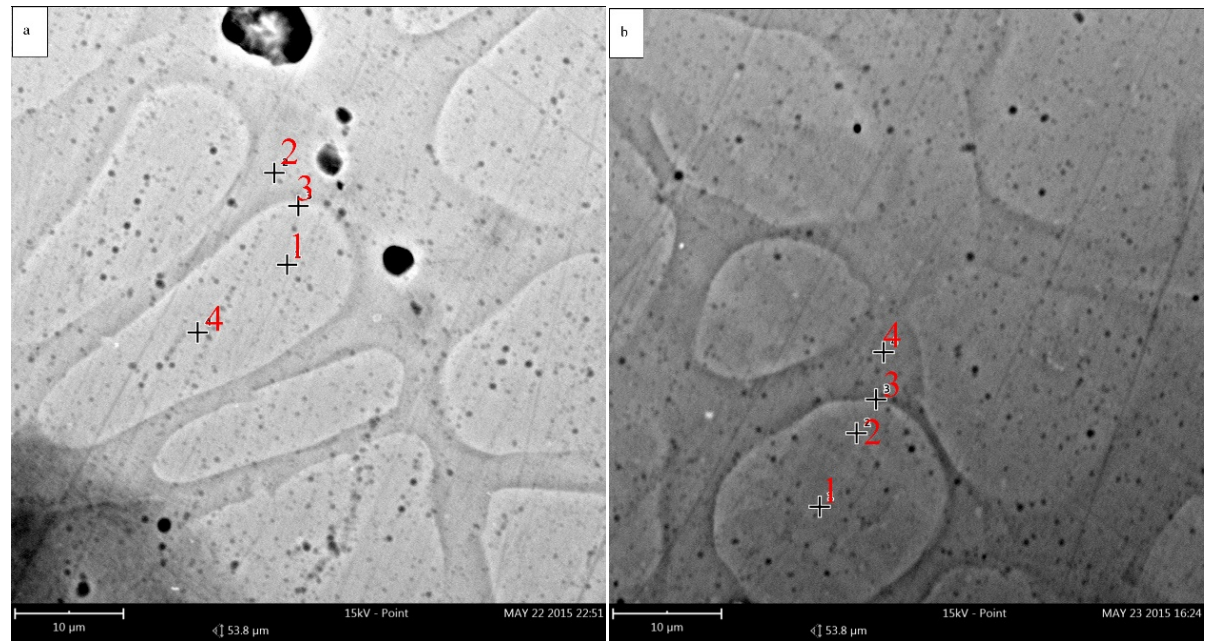
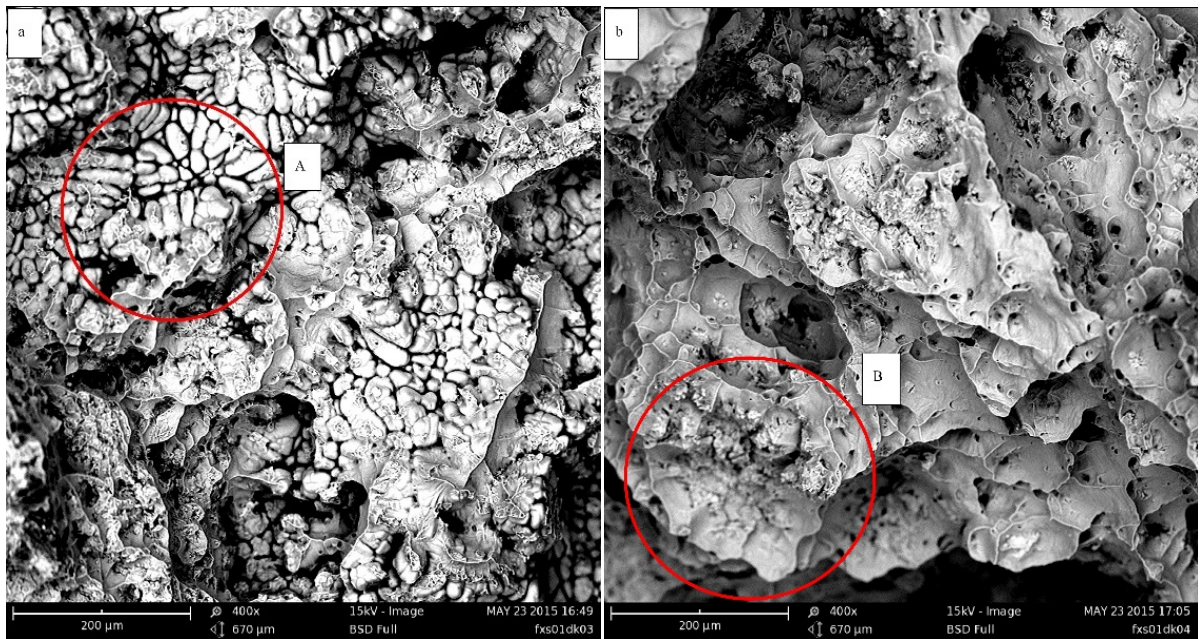


Figure 5. Energy spectrum analysis of ultrasonic treatment at different temperatures: (a) 640°C; (b) 660°C
图 5. 不同温度下超声波处理点能谱分析: (a) 640°C; (b) 660°C



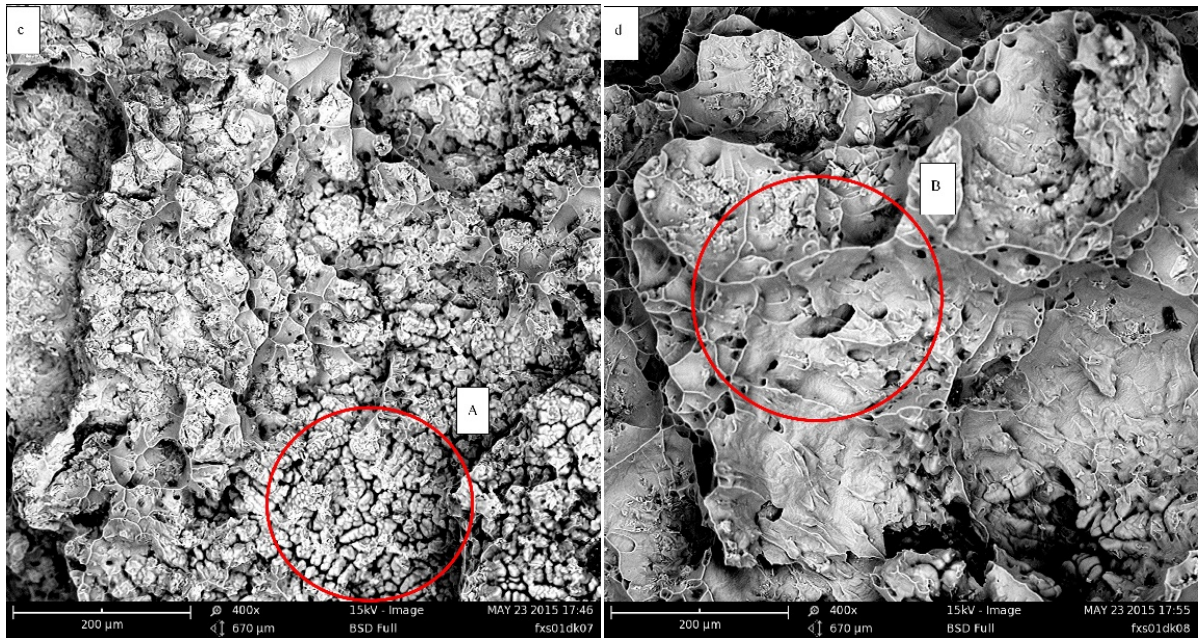


Figure 6. Tensile and impact fracture morphology after ultrasonic treatment: (a) Tensile fracture at 640°C; (b) Tensile fracture at 660°C; (c) Impact fracture at 640°C; (d) Impact fracture at 660°C

图 6. 超声波处理后的拉伸、冲击断口形貌：(a) 640°C 拉伸断口；(b) 660°C 拉伸断口；(c) 640°C 冲击断口；(d) 660°C 冲击断口

比较 640°C 和 660°C 的拉伸冲击断口形貌(图 6)可以看出, 640°C 下超声波处理后的断口多为沿晶断裂(A), 而 660°C 超声波处理后的断口多为“韧窝”状的韧性穿晶断裂(B)。这是由于超声波处理会改善 Mg 在合金中的微观偏析情况[13], 如表 5 所示, 超声波处理后产生的声流效应、机械效应加快了元素在固液界面上的传输能力, 加快了元素的扩散, 改善了 Mg 元素的显微偏析(见图 5), 进而改善 5356 铝合金的力学性能, 这也就是 660°C 处理后的合金力学性能比 640°C 处理后要好的原因之一。

5356 铝合金的液相线温度为 638°C [1], 由于 640°C 非常接近合金液相线, 导致了合金的金属熔体粘度 μ 很大, 这时超声波处理的空化效应所产生的微小空化气泡受到的声流脉冲作用会大大降低, 空化气泡的膨胀、崩碎过程会变得异常缓慢, 所以使得异形相核数降低, 降低了细化效果。640°C 超声波处理后还存在着较大的枝晶(图 3a), 这也是由于粘度增大降低了超声波的声流效应。虽然超声波的处理过程会降低 5356 铝合金熔体的过冷度[14], 但是声流效应的降低, 减缓了树枝晶碎片的形成, 使得局部区域出现了树枝晶十分粗大的现象。这两个现象同时也说明了 Eskin [15]所提到的两种细化机制在超声波处理过程中都起到了作用, 超声波细化是两种机制共同作用的结果。而随着温度的升高, 熔体降低了粘度, 加快了流速, 进而使超声波空化效应和声流效应得以加强, 所以细化效果与效率都得到了明显的提高。而超过 660°C 这一峰值温度后, 670°C 的细化效果逐渐开始下降, 这是由于在较高温度进行超声波处理时, 超声波的热效应会越来越明显, 从而给予了某些已经细化的晶粒长大的能量, 所以在局部区域出现了枝晶, 细化效果出现了滑坡的趋势。

与原始样比较(图 4), 低温(接近液相线温度)超声处理后的力学性能反而不如原始样, 出现了性能倒退的现象, 这是由于在温度较低时, 所浇铸的试样气孔等缺陷非常明显。因为生产经验中的浇铸温度为 710°C [2], 而在 640°C 等接近液相线的温度进行超声处理并浇铸, 会因为熔体粘度过大, 出现补缩困难的现象, 所以产生了很多宏观缺陷, 大大影响了合金的力学性能。

3.2. 时间对超声波处理效果的影响

5356 铝合金在不同时间超声波处理下的显微组织如图 7 所示，力学性能如图 8 和表 6 所示。

超声波处理时间也是决定处理效果的重要影响因素之一。时间增加，自然超声作用时间增加，更能发挥空化作用、声流作用等超声效应[16]。经过四组时间的变化，发现时间同样也是呈现先增后减的趋势(如图 7)，但时间变化后晶粒度的差值并不大(如表 6)，由 6.4→7.5→7.2 变化，效果没有那么显著。抗拉强度最大值出现在 3 min 时，为 188.70 Mpa，此时最大应变值也达到最大 7.46%。时间的增加同样会增加热效应，从而使晶粒有长大的趋势。由此可以看出热效应是时间、温度和功率共同作用的结果，所以超声时间在 2~3 min 中时更能得到良好的综合力学性能。

3.3. 功率对超声波处理效果的影响

5356 铝合金在不同功率超声波处理下的显微组织如图 7 所示，力学性能如图 8 和表 6 所示。

超声波功率的输出大小与超声波的声波强度有着密切的联系，功率变大，声波强度增大，就会促进声空化[16]。在调整功率参数的过程中，功率的增大使得晶粒细化效果得到了增强，如图 9，这正是由于声波强度的增加促进了空化现象的出现，空化气泡膨胀、破碎的进程加快，从而提高了细化效率和效果。

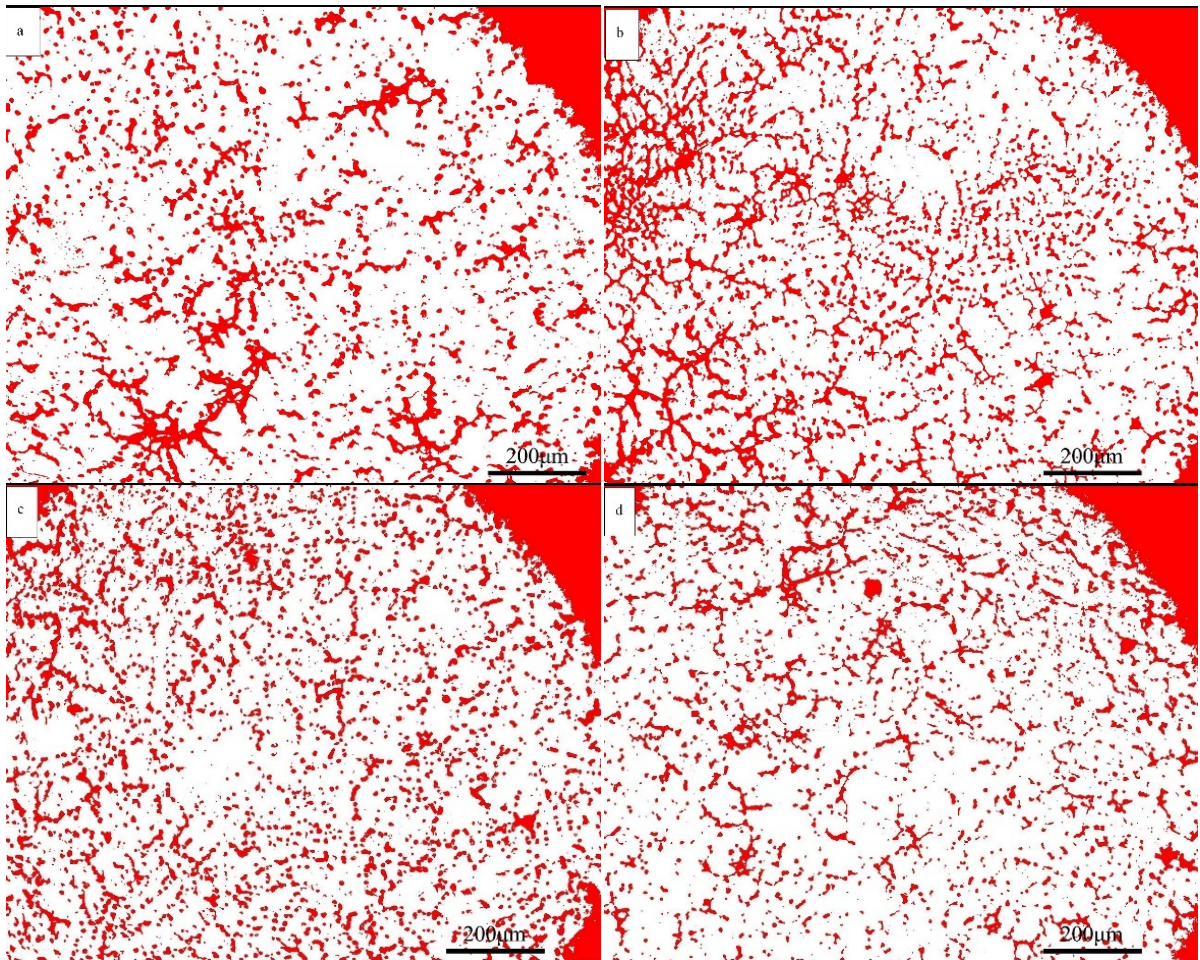


Figure 7. Microstructures of 5356 aluminum alloy under ultrasonic treatment at different times (after binarization treatment): (a) 1 min; (b) 2 min; (c) 3 min; (d) 4 min

图 7. 在不同时间超声波处理下 5356 铝合金的显微组织(经过二值化处理): (a) 1 min; (b) 2 min; (c) 3 min; (d) 4 min

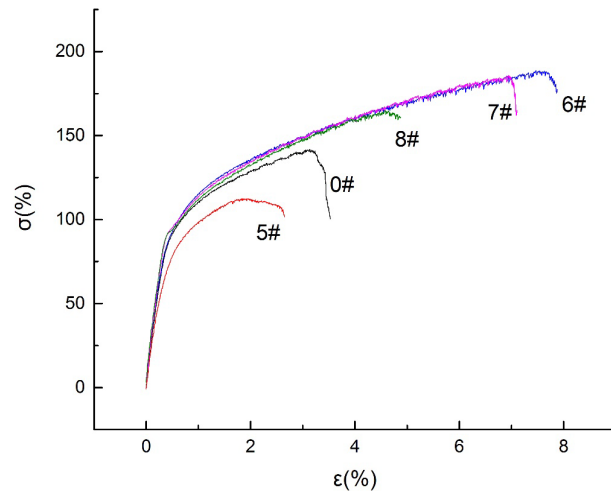


Figure 8. Stress-strain curves of 5356 aluminum alloy under ultrasonic treatment at different times

图 8. 在不同时间超声波处理的 5356 铝合金的应力 - 应变曲线

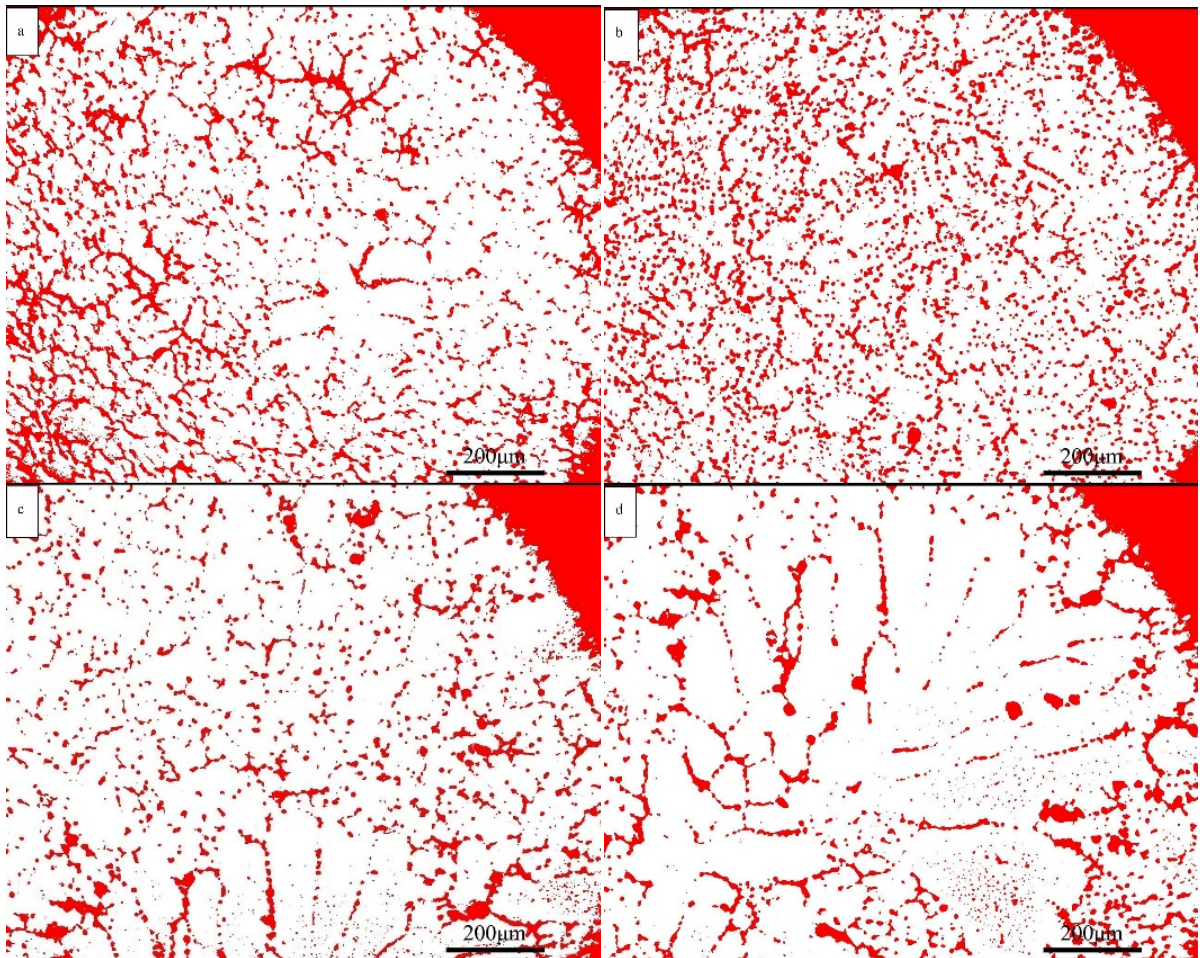


Figure 9. Microstructures of 5356 aluminum alloy under ultrasonic treatment at different power (after binarization treatment): (a) 1100 W; (b) 1300 W; (c) 1500 W; (d) dendrite

图 9. 在不同功率下经过超声波处理的 5356 铝合金的显微组织(经过二值化处理): (a) 1100 W; (b) 1300 W; (c) 1500 W; (d) 树枝晶

不过相对于温度的影响，功率也并非越大越有利。在 1500 W 下超声处理 3 min 后，发现出现了超大的枝晶(图 9d)，这同样是热效应的负面影响造成的。功率变大后，热效应变得十分显著，金属熔体的冷却速度受到了抑制，从而使得破碎的晶粒得以重新长大，形成了超大枝晶。正是这些原因的影响，使得合金的力学性能也呈现先增后减的趋势(图 10)。如表 7，其峰值出现在 1300 W，抗拉强度达到 188.70 Mpa，最大的应变值达到 7.46%。冲击功的变化趋势则与抗拉强度不同，体现出一直增长的态势。这可能是由于冲击韧性更容易受到偏析和杂质的影响，而功率的一直增加使得偏析得到了更好的改善，因而出现单调递增的关系。

Table 6. Mechanical properties of 5356 aluminum alloy under ultrasonic treatment at different times
表 6. 在不同时间超声波处理后 5356 铝合金的力学性能

试样编号	平均晶粒度评级	最大应变值(%)	抗拉强度(Mpa)
5#	6.42	1.8350	112.586
6#	7.50	6.9400	185.779
7#	7.25	7.4675	188.704
8#	7.23	4.5650	164.909

Table 7. Mechanical properties of 5356 aluminum alloy under ultrasonic treatment at different power
表 7. 在不同功率超声波处理下 5356 铝合金的力学性能

试样编号	平均晶粒度评级	最大应变值(%)	抗拉强度(Mpa)	冲击功(J)
9#	7.22	3.6575	151.122	9.2
10#	7.25	7.4675	188.704	10.2
11#	5.80	6.1975	158.065	12.2

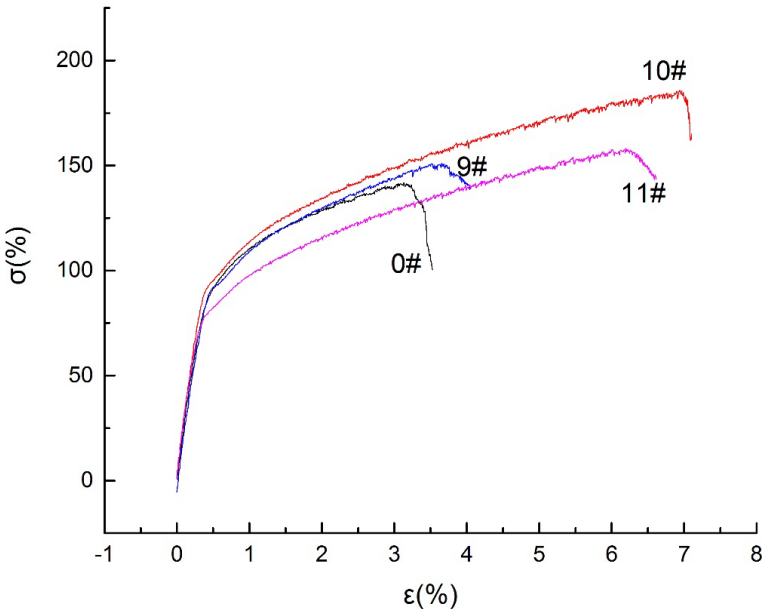


Figure 10. Stress-strain curves of 5356 aluminum alloy under ultrasonic treatment at different power
图 10. 在不同的功率下超声波处理的 5356 铝合金的应力 - 应变曲线

4. 结论

1) 对 5356 合金熔体施加超声波处理, 由于空化效应和声流效应, 形成了树枝晶碎片和空化气泡, 起到了晶粒细化的作用, 并改善合金中 Mg 的显微偏析;

2) 由于热效应的存在, 5356 合金的超声波处理效果随温度、功率、时间增加都呈现先增后减的趋势, 最佳处理参数处理温度: 660℃、处理时间: 2~3 min、输出功率: 1300 W。

基金项目

广西大学 2015 “大创计划” 自治区级创新训练项目(201510593192), 广西有色金属及特色材料加工重点实验室建设项目(13-A-02-03), 广西壮族自治区教育厅科研资助项目(2013YB012); 2013 年度广西高等教育教学改革工程重点资助项目(2013JGZ104), 广西有色金属及特色材料加工重点实验室资助项目(15-140-03)。

参考文献 (References)

- [1] 纪艳卿. 焊丝用. 5356 铝合金制备工艺的研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 2010.
- [2] 郭飞跃, 尹志明, 姜峰, 等. 大型铝型材焊丝、焊接工艺及焊接头组织与性能[J]. 铝电力机车技术, 2001, 24(3): 35-38.
- [3] 潘复生, 张丁非. 铝合金及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 118-313.
- [4] 李念奎, 凌杲, 聂波, 等. 铝合金材料及其热处理技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012: 122.
- [5] 焦好军, 胡明臣, 周炼刚, 等. 新一代运载火箭 2219 铝合金配用焊丝研制[J]. 宇航材料工艺, 2007(6): 61-64.
- [6] 卫晏华, 尹志民. 铁路列车车辆用大型铝合金型材焊丝的选用与生产[J]. 有色金属加工, 2005, 34(4): 21-24.
- [7] 梁贺, 胡捷, 李德富, 等. 焊丝用 5356 铝合金连铸精细成型的研究[J]. 铸造技术, 2014, 35(9): 2121-2124.
- [8] 铝合金焊料课题组. 航天用高强度铝合金焊丝研究报告[S]. 北京: 有色金属与稀土应用, 1999.
- [9] 黄敏, 刘铭, 张坤, 等. 铝及铝合金焊丝的研究与发展现状[J]. 有色金属加工, 2008, 37(2): 9-12.
- [10] 杨运猛. 超声场对铝合金凝固作用机制试验研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2009.
- [11] 哈尔滨焊接研究所, 长洲华通焊丝有限公司, 上海斯米克焊材有限公司, 等. GB/T 10858-2008 铝及铝合金焊丝[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [12] 胡赓祥, 蔡珣, 戎咏华, 等. 材料科学基础[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2011: 167.
- [13] 刘清梅. 超声波对金属凝固特性及组织影响的研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海大学材料科学与工程学院, 2007.
- [14] 吴钰. 超声振动对 7050 铝合金熔体凝固动力学过冷度的影响[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2009.
- [15] Eskin, G.I. (1998) Ultrasonic Treatment of Light Alloy Melts. Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam.
- [16] 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.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：meng@hanspub.org