

# 电磁搅拌与超声作用对 6082 铝合金成分偏析的影响研究

刘俞伯<sup>1</sup>, 申玉婷<sup>1</sup>, 张宇博<sup>1, 2</sup>, 李绍威<sup>3</sup>, 许晨玲<sup>3</sup>, 李廷举<sup>1, 2</sup>

(1. 大连理工大学材料科学与工程学院, 辽宁大连 116000; 2. 大连理工大学宁波研究院, 浙江宁波 315000;

3. 大连汇程铝业有限公司, 辽宁大连 116000)

**摘要:** 消除宏观偏析是制备高品质6082铸坯的重要环节。本文研究了电磁搅拌、超声场和添加细化剂等熔体处理手段对6082铸锭宏观偏析的影响规律。结果表明: 施加电磁搅拌和超声场均能减少Mg和Si的偏析, 作用效果随电磁搅拌电流强度和超声作用时间的增加而增强。当磁场电流强度为20 A时, Mg和Si的偏析比由未施加电磁搅拌的1.113、1.224减小至1.037、1.048, 分别降低6.8%和14.3%。施加超声作用150 s时, Mg和Si的偏析比减小至1.041和1.047, 相较未施加时, 降低了6.5%和14.5%。同时, 电磁搅拌和超声作用有效促进了元素在横截面径向上的均匀分布。作为对比, 加入Al-Ti-B细化剂可大幅减小6082的平均晶粒尺寸, 但对元素偏析作用不明显, 电磁搅拌和超声作用对偏析的改善作用主要源自物理搅拌。

**关键词:** 6082铝合金; 宏观偏析; 电磁搅拌; 超声作用

## 作者简介:

刘俞伯(1996-), 男, 硕士, 主要研究方向为高品质6082铝合金的熔铸制备。  
E-mail: jack\_liuyb@163.com

## 通讯作者:

张宇博, 男, 副教授, 博士。电话: 13500747899;  
E-mail: ybzhang@dlut.edu.cn

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

02-0140-07

## 基金项目:

国家自然科学基金资助项目(51971048); 大连理工大学重点实验室科研专题资助项目(DUT20LAB141)。

## 收稿日期:

2022-04-26 收到初稿,

2022-06-27 收到修订稿。

6082合金是一种常见的热处理强化铝合金, 具有良好的力学性能、焊接性能、耐腐蚀性和可加工性<sup>[1-2]</sup>, 是轨道交通、电力传输等多个领域不可或缺金属材料。宏观偏析是6082合金铸造过程中一种较严重的缺陷, 一方面偏析在常规铸造中自然发生, 大直径的6082圆锭表层经常出现明显的Si和Mg元素宏观偏析<sup>[3-4]</sup>; 另一方面偏析在后续的加工工艺中无法消除, 作为一种不可逆的缺陷, 会一直留存在最终产品中。偏析对产品稳定性影响较大, 增加6082铸锭的热裂倾向<sup>[5-6]</sup>, 严重地影响了后续热处理以及产品的力学性能与使用性能。消除6082合金的元素偏析是获得高品质合金铸坯的重要环节, 对于6082合金的应用有着重要的意义。

国内外一些学者针对铝合金中元素偏析展开了研究, 其中, 熔体处理是一种有效消除偏析的方法。东北大学的崔建忠在Al-4.5Cu<sup>[7]</sup>和7075合金<sup>[8]</sup>的半连续铸造过程中加入低频磁场, 认为磁场作用使合金元素的有效分配系数增大, 微观偏析得到改善。中南大学的李晓谦在Al-Cu<sup>[9]</sup>和7050合金<sup>[10]</sup>的半连续铸造过程中加入超声作用, 净化晶粒并弱化偏析, 认为超声场抑制固液两相的相对运动是减小宏观偏析产生的主要原因。北京航空材料研究院的郑卫东<sup>[11]</sup>优化了Al-5Ti-B的添加工艺, 加强了晶间结合力, 使合金热裂倾向降低, 改善了ZL205A的偏析缺陷。

研究表明, 金属凝固过程中施加物理场或加入细化剂改善凝固组织, 对成分偏析有一定的抑制作用, 但其合金体系元素含量一般较高, 针对元素含量较低的6082铝合金, 目前鲜有报道。本文在6082铝合金铸造过程中, 施加不同强度条件的电磁搅拌、不同作用时间的超声场、加入细化剂, 比较电磁搅拌、超声作用与细化剂的添加对6082铝合金中溶质元素分布的影响, 优化6082合金的熔铸工艺。

## 1 试验方法

### 1.1 试验材料

试验材料为6082铝合金, 合金成分和实际测量成分如表1所示, Mg和Si元素是

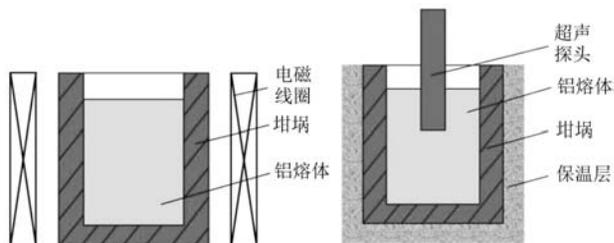
表1 6082铝合金的设计成分和测量成分  
Table 1 Chemical composition of the 6082 aluminum alloy

项目	Si	Mg	Cu	Fe	Zn	Mn	Ti	Cr	Al
设计成分	0.70~1.30	0.60~1.20	0.10	0.50	0.20	0.4~0.6	0.10	0.25	余量
实测成分	0.974	1.012	0.001	0.183	0.004	0.005	0.008	0.001	余量

含量较多的溶质元素，经固溶处理可生成 $Mg_2Si$ 相，有效强化基体。考虑到6082中不可避免会掺入Fe元素，消耗Si元素生成 $AlFeSi$ 相，因此Si添加量一般和Mg相同。为了便于操作，本试验将6082合金简化为Al-1%Si-1%Mg，其余元素为工业纯铝、工业纯镁和冶金硅原料。

## 1.2 外场处理

在电阻井式炉中（型号5k-12，沈阳节能电炉厂）熔炼6082合金，720℃保温1 h，确保Mg和Si元素全部熔化并搅拌均匀，当熔体温度降至700℃时（6082合金液相线上50℃），将熔体置于电磁线圈内（图1a），同时开启电磁搅拌，使熔体在电磁搅拌的作用下旋转，熔体的凝固速度近似等于1 K/s，施加电磁搅拌直至6082熔体完全凝固，获得直径55 mm的6082铸锭。凝固过程中分别施加输入电流10 A、15 A、20 A的电磁搅拌，对应的磁场强度分别为5.8 mT、7.9 mT、10.1 mT。



(a) 电磁搅拌 (b) 超声处理

图1 6082铝合金熔体处理示意图

Fig. 1 Diagram of treatment process of the 6082 melt

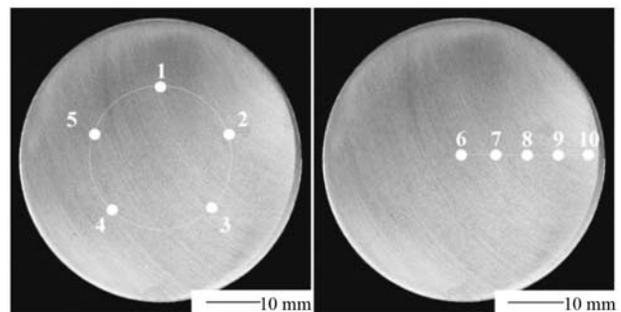
相同条件下熔炼6082合金，当熔体温度为700℃时，对6082熔体进行超声处理（图1b），冷却速度同样为0.1 K/s，超声处理时间分别为50 s、100 s、150 s，之后将熔体浇入常温坩埚中空冷至合金凝固，冷却速度约1 K/s。本文使用的超声波振动系统（型号YPZD021520，杭州成功超声有限公司）最大额定功率为1 500 W。装置由20 kHz超声电源、压电陶瓷换能器、变幅杆及不锈钢工具头组成。不锈钢工具头长260 mm，直径为30 mm，超声功率达到最大时对应振幅为7.5 μm。使用时不锈钢工具头浸入6082熔体液面下10 mm左右，由于温度较低且加载时间较短，不锈钢工具头与6082熔体发生轻微反应。

## 1.3 添加细化剂

本研究使用细化剂为Al-5Ti-B，添加量为0.2%。相同条件下熔炼6082合金，当熔体降至700℃时，加入质量比为0.2%的Al-5Ti-B细化剂，搅拌均匀，保温5 min后浇注至石墨坩埚中凝固，获得直径55 mm的6082铸锭。

## 1.4 取样分析

因6082铸坯多为连续铸造获得，因此本文主要针对铸锭横截面上的元素分布进行研究。在铸锭轴向上的中心位置处切开，在样品截面的1/2处任选5点测量元素含量，标记为1-5点，位置如图2a所示。为进一步研究沿径向的元素分布规律，在径向方向从中心到边缘每间隔6 mm标记，记为6-10点，位置如图2b所示。利用辉光光谱仪对元素含量进行分析，将测得成分含量绘制沿径向的成分分布曲线。



(a) 铸锭横截面取样位置 (b) 径向方向取样位置

图2 元素含量测量取样示意图

Fig. 2 Schematic diagram of measurement site of the element content

## 2 试验结果与分析

### 2.1 电磁搅拌对6082合金元素偏析的影响

图3为施加不同强度电磁搅拌后，6082铝合金铸锭的宏观截面图，施加电磁搅拌使铸锭晶粒明显细化，电流强度分别为0、10 A、15 A、20 A时，铸锭的平均晶粒尺寸分别为1.958 mm、0.746 mm、0.948 mm、0.685 mm，在施加20 A电流强度电磁搅拌作用下细化效果最好，平均晶粒尺寸减小65.0%。

在6082铝合金凝固过程中施加不同电流强度的电磁搅拌，测量铸锭横截面1-5点的Mg、Si元素含量如表2和表3所示。当电流强度从0升至20 A时，Mg和Si元素

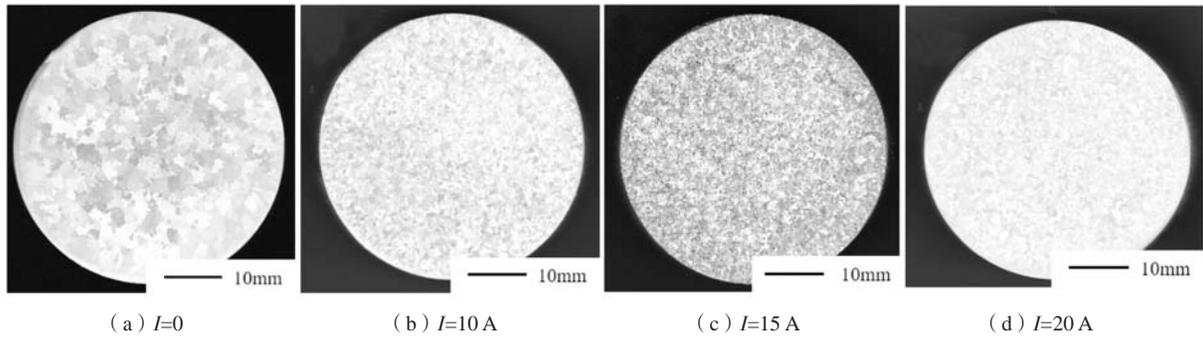


图3 不同强度电磁搅拌作用下6082铸锭宏观组织

Fig. 3 Macrostructures of the 6082 alloy ingot under EMS with different currents

表2 不同电流强度电磁搅拌下6082铸锭截面1-5点处Mg元素含量

Table 2 Contents of the Mg element at 1-5 points under EMS with different current intensities  $w_B/\%$

电流强度/A	Mg元素含量					平均值	标准差
	点1	点2	点3	点4	点5		
0	1.039 9	1.063 3	1.082 3	0.972 3	1.076 4	1.047	0.045
10	0.983 7	0.910 7	0.994 3	1.032 4	0.980 2	0.980	0.044
15	1.004 9	0.953 1	1.055 8	1.012 4	1.019 2	1.009	0.037
20	1.008 8	0.989 7	1.017 5	1.026 4	1.002 2	1.009	0.014

表3 不同电流强度电磁搅拌下6082铸锭截面1-5点处Si元素含量

Table 3 Contents of the Si element at 1-5 points under EMS with different current intensities  $w_B/\%$

电流强度/A	Si元素含量					平均值	标准差
	点1	点2	点3	点4	点5		
0	1.086 2	1.149 5	0.946 9	1.151 8	1.159 3	1.098	0.090
10	0.988 4	0.888 8	0.995 1	1.085 0	0.962 8	0.984	0.070
15	1.027 6	0.954 1	1.121 6	1.059 7	0.969 6	1.026	0.068
20	1.027 2	1.001 6	1.038 3	1.012 0	1.049 6	1.025	0.019

分布趋于均匀, 平均含量接近加入值, 元素含量的标准差也随电流强度的增加而减小。在电流强度20 A时, 标准差最小。

为进一步评价6082凝固组织中的偏析程度, 引入

偏析比 $q$ ,  $q=C_{max}/C_{min}$ 。式中 $C_{max}$ 为溶质元素质量分数的最大值,  $C_{min}$ 为质量分数的最小值。偏析比 $q$ 可以表征6082铸锭横截面的元素偏析程度,  $q$ 趋近于1表示成分分布均匀,  $q$ 越大表示偏析越严重。计算得Mg和Si元素在施加不同强度电磁搅拌条件下, 偏析比依次为1.113、1.134、1.108、1.037和1.224、1.221、1.176、1.048。如图4所示, 施加电磁搅拌后, Mg和Si在截面上的宏观偏析有效减少, 元素的偏析比随电磁搅拌强度的增加而减弱。当电流强度为20 A时, 元素偏析改善效果达到最佳, 相较未施加磁场, Mg和Si元素的偏析比分别降低了6.8%和14.3%。

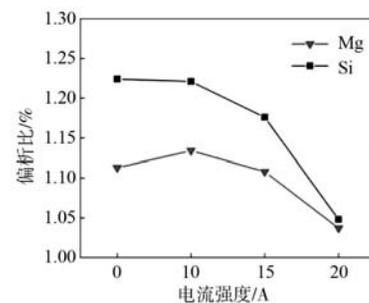


图4 电磁搅拌对Mg和Si元素偏析比的影响

Fig. 4 Effect of EMS on the segregation ratio of the Mg element and Si element

进一步研究电磁搅拌对径向元素分布的影响, 图5所示为6-10点Mg、Si元素含量。未施加电磁搅拌时,

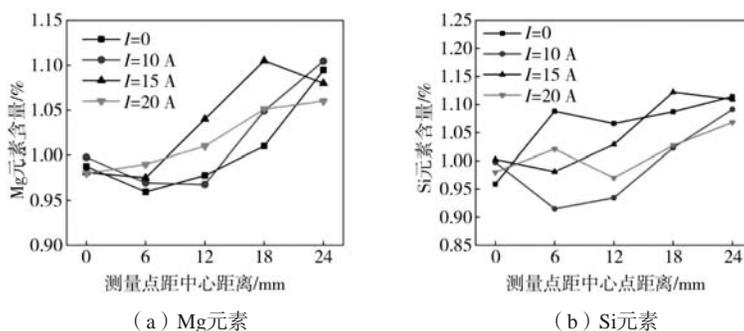


图5 电磁搅拌下Mg和Si元素在径向的含量分布

Fig. 5 Content distributions of the Mg and Si elements in radial direction under EMS

铸锭中Mg和Si两种元素的偏析趋势相同，由铸锭边缘向中心元素含量逐渐减小，径向上呈现负偏析（即合金铸锭在表层一定范围内溶质浓度由外向内逐步降低的内部缺陷，反之称为正偏析），这与文献报道相同<sup>[3]</sup>。随着电磁搅拌强度的增加，元素分布曲线趋于平缓，径向的负偏析逐渐减弱。当电流强度从0增加至20 A时，Mg和Si元素沿径向方向上的偏析比分别为1.141、1.139、1.130、1.082和1.162、1.193、1.143、1.011，随着电磁搅拌强度的增加，偏析比逐渐降低。当电流强度20 A时，Mg和Si元素的偏析比分别减小5.2%和13.0%，电磁搅拌作用有助于改善铸锭径向的宏观偏析。

### 2.2 超声作用对 6082 铝合金元素偏析的影响

图6为施加超声作用后，6082铝合金铸锭的宏观

截面图，施加超声作用时间为0、50 s、100 s、150 s时，铸锭平均晶粒尺寸分别为1.958 mm、0.333 mm、0.302 mm、0.294 mm。随着超声作用时间的增长，晶粒尺寸逐渐变小。超声作用150 s，细化效果最为明显，细化后的晶粒较原始样品减小了85.0%。

表4和表5为不同超声作用时间下，Mg和Si元素在横截面上成分分布。和电磁搅拌作用相同，对6082的熔体进行超声处理可以有效改善元素的宏观偏析，促进Si和Mg元素的均匀分布。施加超声作用50 s后，Mg和Si元素分布的标准差显著降低，并随着作用时间的增加逐渐减少。不同超声作用时间下元素的偏析比如图7所示，Mg和Si元素的偏析比依次为1.113、1.052、1.052、1.041和1.224、1.069、1.057、1.047。

超声作用对Mg和Si元素在6082铸锭径向上的分布影响如图8所示。未施加超声时，两种元素径向上呈现

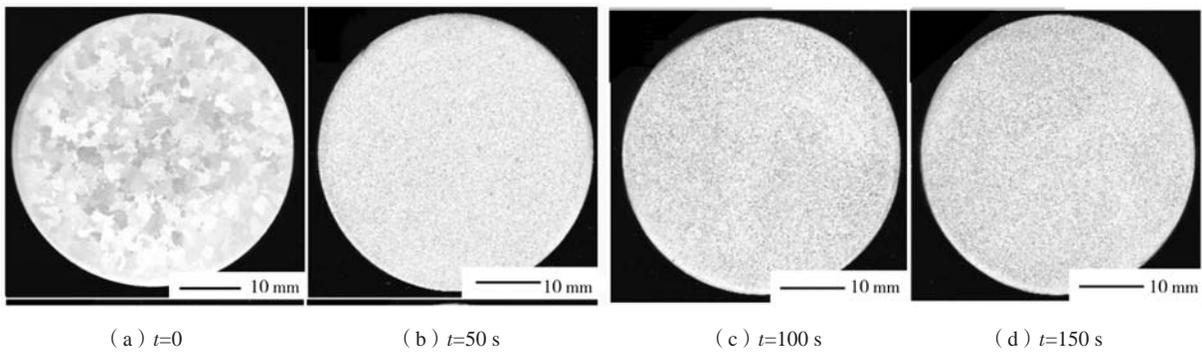


图6 不同超声作用时间下6082铸锭宏观组织

Fig. 6 Macrostructures of the 6082 alloy ingot under UST with different times

表4 不同超声作用时间铸锭截面1-5点Mg元素含量  
Table 4 Contents of the Mg element at 1-5 points under UST with different times  $w_B/\%$

超声作用时间/s	Mg元素含量					平均值	标准差
	点1	点2	点3	点4	点5		
0	1.039 9	1.063 3	1.082 3	0.972 3	1.076 4	1.047	0.045
50	0.906 7	0.869 2	0.914 1	0.902 7	0.895 0	0.898	0.017
100	0.928 0	0.912 4	0.895 4	0.882 3	0.913 7	0.906	0.018
150	0.996 6	0.972 1	0.963 7	0.983 1	0.957 3	0.975	0.016

表5 不同超声作用时间铸锭截面1-5点Si元素含量  
Table 5 Contents of the Si element at 1-5 points under UST with different times  $w_B/\%$

超声作用时间/s	Mg元素含量					平均值	标准差
	点1	点2	点3	点4	点5		
0	1.086 2	1.149 5	0.946 9	1.151 8	1.159 3	1.098	0.090
50	0.993 0	1.033 4	0.967 1	1.002 7	0.987 0	0.997	0.024
100	1.041 4	0.985 5	0.992 1	0.995 7	0.993 8	1.002	0.023
150	1.149 8	1.157 2	1.115 8	1.105 4	1.134 0	1.132	0.021

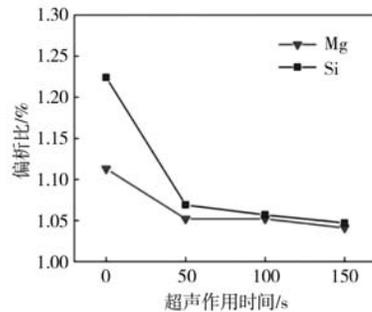


图7 超声作用时间对Mg和Si元素偏析比的影响

Fig. 7 Effect of UST time on the segregation ratio of the Mg and Si elements

负偏析。随着超声作用加强，Mg和Si元素在边部含量降低，中心的含量增加，元素趋于均匀分布。超声作用150 s时，铸锭横截面径向上的不同位置的元素分布曲线最平缓，径向的分布最均匀。在施加0、50 s、100 s、150 s超声作用下，Mg和Si元素沿径向方向上的偏析比分别为1.127、1.094、1.105、1.056和1.198、1.107、1.097、1.073，同样验证超声作用可以改善Mg、Si元素在径向方向上的宏观偏析。

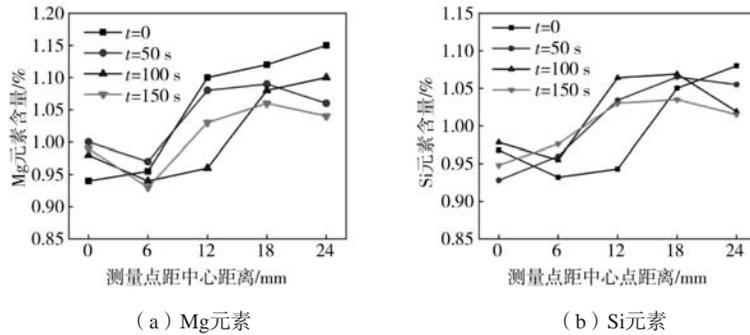


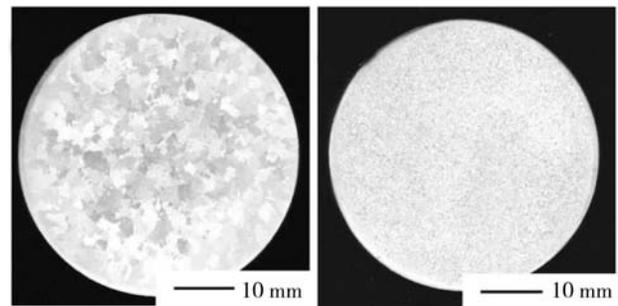
图8 超声作用下Mg和Si元素在径向的含量分布

Fig. 8 Content distributions of the Mg and Si elements in the radial direction under UST

### 3 讨论

在6082铝合金凝固的过程中, 由于熔体径向存在温度梯度, 靠近坩埚壁的区域由于温度较低, 会率先形核凝固, 晶核会沿着热流的相反方向以枝晶的方式向熔体内部生长。在 $\alpha$ -Al枝晶生长的过程中, Mg和Si元素会不断向外排出并在固液界面前沿形成富集, 径向上的顺序凝固造成凝固组织中的元素偏析。

施加电磁搅拌和超声处理均可在熔体中形成对流, 促进元素的均匀分布, 同时在凝固过程中有效地细化晶粒。为进一步探究晶粒细化与对流运动两种作用对溶质元素宏观偏析改善的效果, 试验在合金熔炼过程中添加0.2%的Al-5Ti-B细化剂。图9为添加细化剂的6082铝合金铸锭的宏观组织图。加入细化剂后晶粒明显细化, 铸锭的平均晶粒尺寸由1.958 mm细化至0.373 mm, 平均晶粒尺寸减小80.9%。细化剂对6082的细化效果和电磁搅拌及超声作用相似。



(a) 原始铸锭 (b) 加入细化剂

图9 6082铸锭宏观组织

Fig. 9 Macrostructures of the 6082 alloy ingot

表6为加入细化剂前后Mg和Si元素的含量分布, 可以看出, 细化剂的加入使Mg、Si两种元素分布的标准差有一定程度减小, 晶粒细化能够促进元素的均匀分布。但其作用效果与电磁搅拌和超声作用相比影响较小。

表6 加入细化剂前后6082铸锭截面1-5点处Mg、Si元素含量  
Table 6 Contents of the Mg and Si elements at 1-5 points with or without refiner

元素	细化剂添加量/%	元素含量					平均值	标准差
		点1	点2	点3	点4	点5		
Mg	0	1.039 9	1.063 3	1.082 3	0.972 3	1.076 4	1.047	0.045
Si	0	1.086 2	1.149 5	0.946 9	1.151 8	1.159 3	1.098	0.090
Mg	0.2	0.993 2	0.953 5	1.041 3	1.021 8	0.965 8	0.995	0.037
Si	0.2	1.034 2	1.067 0	0.960 7	1.120 6	1.068 0	1.050	0.059

图10为添加细化剂后6082铸锭平均晶粒尺寸与Mg、Si元素偏析比的对比, 在未加入细化剂时, Mg和Si元素的偏析比分别为1.113和1.224, Mg元素偏析比非常接近1, Mg元素的分布更加均匀。添加细化剂后, Mg和Si元素的偏析比为1.092和1.166, 相较于未加入细化剂时, 偏析比降低1.9%和4.7%, 由此看出, 晶粒尺寸的变化对溶质元素宏观偏析影响不明显。

无论是加入细化剂、电磁搅拌和超声处理, 6082铸锭的晶粒尺寸均明显降低, 不同熔体处理手段均可

达到细化组织的目的。但电磁搅拌和超声处理可以有效改善Mg和Si的元素偏析, 促进元素的均匀分布, 而加入细化剂对元素分布的影响较小。这说明电磁搅拌和超声作用对偏析行为的影响主要来自于两者在熔体凝固过程中产生的搅拌作用。

施加电磁搅拌作用后, 熔体受到切向的洛伦兹力, 导致固液两相间发生强迫对流, 将铸锭中心温度较高的熔体输送至铸锭边部, 促进了熔体内部的传热和传质。施加电磁搅拌作用后, 凝固前沿附近熔体流

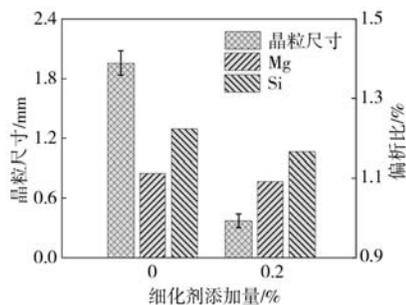


图10 不同细化剂添加量晶粒尺寸与元素偏析比

Fig. 10 Grain sizes and segregation ratios with different amounts of the refiner

速加快,在液穴内流动速度变快,加剧了熔体边部与熔体中心的热对流,使得熔体发生强迫对流,传热方式从单一热传导转换为热对流和热传导两种方式,熔体中的温度场分布趋于均匀。均匀的流场和温度分布使得溶质元素在铸锭径向分布均匀,使得6082铝合金中Mg、Si在铸锭边部的正偏析减弱,促进了凝固组织中元素的均匀分布。此外,施加电磁搅拌提升了固液相线温度,对固相线的提升幅度大于液相线,从而使结晶区间缩小<sup>[12]</sup>,缩短了Mg和Si元素在液固两相区的停留时间,会减少Mg<sub>2</sub>Si初生相的数量和尺寸,促进溶质元素在晶粒内的含量。同时,这也会促进凝固前沿加速移动,增加有效溶质分配系数,改善元素的微观偏析<sup>[13]</sup>。从宏观和微观的角度分析,电磁搅拌的施加都有利于元素的均匀分布,减少偏析。

超声作用的施加会在金属熔体中产生空化作用和声压作用,空化效应所产生的微射流和冲击波,促进溶质元素分布均匀化;同样空化效应对熔体产生的高温高压作用使熔体能量增加,会加剧熔体中的固体微

粒高速碰撞,并引起液体的宏观湍动,对溶质元素的传递与扩散起到强化作用,促使溶质元素分布均匀化<sup>[14-15]</sup>。声压作用于整个熔体促进熔体流动,声流作用会将处于边部的温度较低的熔体推动至铸锭中心,改善熔体的凝固条件,优化了熔体由边部至中心的温度场,使温度分布均匀,有利于Mg、Si两种溶质元素充分扩散和均匀化。此外,空化作用能够提高Mg和Si等元素在 $\alpha$ -Al基体的固溶度<sup>[16-17]</sup>,并且随着超声功率和作用时间的增加,其对溶质元素在基体中的固溶效果越好。这会有效增加平均分配系数,从而促进溶质元素的均匀分布,抑制先凝固区域与后凝固区域溶质元素含量的差别。

## 4 结论

(1) 施加电磁搅拌能有效改善6082铸锭横截面Mg和Si的偏析,作用效果随施加电流强度的增加而增强,电流强度为20 A时,Mg和Si的偏析比由未施加电磁搅拌的1.113、1.224降低到1.037、1.048,分别减小6.8%和14.3%。

(2) 超声作用有利于促进Mg和Si的均匀分布,作用效果随作用时间的增加而增强,施加超声作用150 s后,Mg和Si的偏析比降低到至1.041、1.047,减小了6.5%和14.5%。

(3) 搅拌作用是改善6082铝合金成分偏析的主要原因,熔体受到电磁搅拌产生的洛伦兹力而形成对流,受到超声处理的空化效应和声压作用产生的冲击波,均促进溶质元素在熔体内的均匀分布,从而减少偏析。

### 参考文献:

- [1] CECILIA P, OMAINB, PRETER L, et al. Microstructure evolution in a 6082 aluminum alloy during thermomechanical treatment [J]. *Materials*, 2018, 11 (8): 1319-1319.
- [2] CHANG Y L, HONG F Y, LUI T S. Study of microstructure and tensile properties of infrared-heat-treated cast-forged 6082 aluminum alloy [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, 8 (1): 173-179.
- [3] 王贵, 周鹏, 陈学武. 低压铸造铝合金轮毂Si偏析的研究 [J]. *铸造工程*, 2010 (4): 24-26.
- [4] 吴树森, 胡祖麒, 万里, 等. 高强韧Al-Mg-Si-Mn合金压铸件的微观组织偏析与力学性能 [J]. *铸造*, 2014, 63 (12): 1197-1201.
- [5] 左强, 洪润洲, 周永江, 等. 溶质偏析对铸造铝合金疏松缩孔缺陷的影响 [J]. *铸造*, 2017, 66 (4): 381-385.
- [6] WENG Yao-yao, DING Li-peng, ZHANG Ze-zhong, et al. Effect of Ag addition on the precipitation evolution and interfacial segregation for Al-Mg-Si alloy [J]. *Acta Materialia*, 2019, 180 (C): 301-316.
- [7] 陈丹丹, 张海涛, 王向杰, 等. 低频电磁铸造Al-4.5%Cu合金微观偏析研究 [J]. *金属学报*, 2011, 47 (2): 185-190.
- [8] 赵志浩, 崔建忠, 左玉波, 等. 低频电磁水平半连续铸造中磁场的分布及其对宏观偏析的影响 [J]. *铸造*, 2005, 54 (3): 241-245.
- [9] PENG Hao, LI Rui-qing, LI Xiao-qian, et al. Effect of multi-source ultrasonic on segregation of Cu elements in large Al-Cu alloy cast ingot [J]. *Materials*, 2019, 12 (17): 2828-2828.
- [10] 黎正华, 李晓谦, 张明, 等. 超声作用下半连续铸7050铝合金的偏析行为及形成机制 [J]. *中国有色金属学报*, 2011, 21 (02): 318-324.

- [11] 郑卫东, 阮磊, 厉沙沙, 等. 晶粒细化工艺对ZL205A合金偏析缺陷的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37 (07): 792-795.
- [12] RIDDER S D, KOU S, MEHRABIAN R. Effect of fluid flow on macrosegregation in axi-symmetric ingots [J]. Metallurgical Transactions B, 1981, 12 (3): 435-447.
- [13] 张勤, 崔建忠, 路贵民, 等. 电磁振荡法半连铸7075合金的微观组织及溶质元素分布 [J]. 中国有色金属学报, 2003, 13 (5): 1184-1191.
- [14] ESKIN G I. Principles of ultrasonic treatment: application for light alloys melts [J]. Advanced Performance Materials, 1997, 4 (2): 223-232.
- [15] LI Jun-wen, MOMONO T, FU Ying, et al. Effect of ultrasonic stirring on temperature distribution and grain refinement in Al-1.65%Si alloy melt [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007 (4): 691-697.
- [16] 彭洪美, 李晓谦, 蒋日鹏, 等. 熔体超声处理对7050铝合金铸锭微观偏析的影响 [J]. 北京理工大学学报, 2016, 36 (11): 1105-1110.
- [17] NADCLLA R, ESKIN D, DU, et al. Macrosegregation in direct-chill casting of aluminium alloys [J]. Progress in Materials Science, 2008, 53 (3): 421-480.

---

## Effects of Electromagnetic Stirring and Ultrasonic Treatment on Composition Segregation of 6082 Aluminum Alloy

LIU Yu-bo<sup>1</sup>, SHEN Yu-ting<sup>1</sup>, ZHANG Yu-bo<sup>1,2</sup>, LI Shao-wei<sup>3</sup>, XU Chen-ling<sup>3</sup>, LI Ting-ju<sup>1,2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116000, Liaoning, China; 2. Ningbo Institute of Dalian University of Technology, Ningbo 315000, Zhejiang, China; 3. Dalian Huicheng Aluminum Co., Ltd., Dalian 116000, Liaoning, China)

### Abstract:

It is important to eliminate the macro segregation for high quality 6082 product. The effects of melt treatments on the segregation of the 6082 alloy were studied in this paper, including electromagnetic stirring (EMS), ultrasonic treatment (UST) and refiner addition. The results showed that both EMS and UST could reduce the segregation of Mg and Si, and the effect was enhanced with the increase of the current intensity of the EMS and action time of the UST. When the current intensity of EMS was 20 A, the segregation ratio of Mg and Si decreased from 1.113, 1.224 to 1.037, 1.048, respectively 6.8% and 14.3%. While after UST for 150 s, those reduced to 1.041 and 1.047, respectively 6.5% and 14.5%. At the same time, both EMS and UST effectively promoted the uniform distribution of the elements in the radial direction of cross section. As a contrast, the addition of Al-Ti-B refiner could obviously reduce the grain size, but hardly contributed to eliminating the segregation. The eliminating of the segregation by the EMS and UST mainly came from physical stirring rather than grain refinement.

### Key words:

6082 aluminum alloy; macro segregation; electromagnetic stirring; ultrasonic treatment