

## Al-Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 细化剂和超声场对纯 Mg 组织的影响 \*

高声远 乐启炽 张志强 崔建忠

(东北大学材料电磁过程研究教育部重点实验室, 沈阳 110819)

**摘要** 在不同 Al-Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 细化剂添加量条件下, 对纯 Mg 熔体进行孕育处理. 当添加质量分数为 1.0% Al-Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 细化剂时细化效果最佳,  $\alpha$ -Mg 晶粒平均尺寸由毫米级降至 106  $\mu\text{m}$ . 在纯 Mg 熔体中施加不同功率超声场, 当施振功率为 600 W 时细化效果最好. 研究表明, 空化泡破碎产生的过冷对形核具有促进作用, 空化泡的破裂及声流对熔体的搅动使得细小枝晶破碎, 形成新的结晶核心, 这一过程对形核起主要作用. 功率超声与 Al-Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 细化剂共同作用于纯 Mg 熔体过程, 可以显著细化晶粒. 其机理为超声对杂质的“活化”作用.

**关键词** 超声场, 纯 Mg, Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>, 晶粒细化

**中图分类号** TG146.2

**文献标识码** A

**文章编号** 0412-1961(2010)12-1495-06

## EFFECTS OF Al-Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> REFINER AND ULTRASONIC FIELD ON MICROSTRUCTURES OF PURE Mg

GAO Shengyuan, LE Qichi, ZHANG Zhiqiang, CUI Jianzhong

Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819

Correspondent: CUI Jianzhong, professor, Tel: (024)83681738, E-mail: jzcui@mail.neu.edu.cn

Supported by National Basic Research Program of China (Nos.2007CB613701 and 2007CB613702) and

National Natural Science Foundation of China (Nos.50904018, 50974037 and 51004032)

Manuscript received 2010-05-13, in revised form 2010-08-04

**ABSTRACT** The melt of pure Mg was inoculated at the conditions of different addition amounts of Al-Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> refiner. When adding 1.0% Al-Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> refiner, the refining effect is the best and the average grain size of  $\alpha$ -Mg is reduced from millimeter level to 106  $\mu\text{m}$ . Ultrasound fields with different power levels were applied on the melt of pure magnesium and the best refining effect was obtained when the power was 600 W. The results show that the undercooling formed by breakdown of cavitation bubbles may have a promoting effect to nucleate. The breakdown of cavitation bubbles and the agitations of acoustic stream on the melt cause the fragmentation of fine dendritic crystal which could form new crystallization nuclei, this process plays the main role for nucleating in the melt. The combined application of ultrasound and Al-Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> refiner to the melt of pure Mg could significantly refine its grain. The mechanism would be an the activation effect of ultrasound on the impurities in the melt.

**KEY WORDS** ultrasound field, pure Mg, Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>, grain refinement

Mg 是结构材料中最轻的金属, 但 Mg 的 hcp 晶体结构决定了它的塑性变形能力较差. 细化纯 Mg 晶粒可显著提高其力学性能<sup>[1,2]</sup>. 目前 Mg 及镁合金的细化方法

主要有过热法、熔剂处理法、固态变形处理和外场孕育法. 其中, 由于过热处理增大了镁合金液的氧化损失和吸氧量, 并且增加了能量和坩埚的消耗, 因而生产上已很少采用<sup>[3,4]</sup>; 固态变形处理对设备的要求较高, 难以实现大规模生产. 作为熔剂处理法的一种, 加碳变质法因操作温度低, 细化效果衰退慢, 已成为 Mg-Al 类镁合金最主要的晶粒细化技术<sup>[5,6]</sup>.

加碳变质法的机理是加入碳质细化剂形成大量弥散的 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 质点作为异质形核的核心, 以提高形核率. Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 与  $\alpha$ -Mg 均为 hcp 晶系,  $\alpha$ -Mg 的晶格常数 ( $a=0.32088$  nm,  $c=0.52017$  nm) 与 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 的晶格常

\* 国家重点基础研究发展计划项目 2007CB613701 和 2007CB-613702, 国家自然科学基金项目 50904018, 50974037 和 51004032, 中央高校基本科研业务费专项资金项目 90409002 和 90209002, 教育部新世纪优秀人才支持计划项目 NCET-08-0098 以及中国博士后科学基金项目 20100471648 资助  
收到初稿日期: 2010-05-13, 收到修改稿日期: 2010-08-04  
作者简介: 高声远, 男, 1983 年生, 博士生  
DOI: 10.3724/SP.J.1037.2010.00230

数 ( $a=0.33388$  nm,  $c=0.49900$  nm) 非常接近. Bramfitt<sup>[7]</sup> 提出, 在非均质形核时, 错配度  $\delta < 6\%$  的核心最有效, 错配度  $\delta$  介于  $6\%—15\%$  的核心视为中等有效, 而错配度  $\delta > 15\%$  的核心则无效. 根据 Bramfitt<sup>[7]</sup> 建立的二维点阵错配度理论模型计算可知,  $(10\bar{1}0)_{\text{Mg}}// (10\bar{1}0)_{\text{Al}_4\text{C}_3}$  有最小的二维点阵错配度  $3.35\%$ , 由此可见,  $\text{Al}_4\text{C}_3$  可作为初生  $\alpha\text{-Mg}$  相的异质核心而细化晶粒.

超声孕育细化的原理是利用超声场在熔体中产生的声空化和声流效应达到细化组织的目的, 其优点是不会对环境和材料本身造成污染. 超声的空化作用机理是在声波的负压相内, 液体受到拉应力, 形成空化泡. 当声压达到一定值时, 气泡将迅速膨胀, 在随后来临的声波正压相内, 这些空化泡将以极高的速度闭合或崩溃, 致使在空化发生的微小空间内产生瞬时高温、高压. Eskin<sup>[8,9]</sup> 认为空化效应活化了熔体中的杂质, 从而促进了熔体内的异质形核. 而陈锋<sup>[10]</sup> 认为, 功率超声的正压相的高压以及空化泡破裂产生的冲击波使得熔体等效过冷度提高, 进而提高了形核率. 声流效应作用机理是超声场在液体中传播时, 由于声波与液体中黏性力的交互作用, 有限振幅衰减使液体内从声源处开始形成一定的声压梯度, 引起液体的流动. 声场对介质施加了一个按时间平均、其值不为 0 的力. 超声在液体中引起的声流的加速度较大, 使声流以较大的速度运动, 可达流体热对流速度的  $10—100$  倍. Komarov 等<sup>[11]</sup> 认为空化泡和声流效应打断的枝晶臂被声流卷入熔体, 从而增加晶粒数目.

目前, 这 2 种方法分别或同时在纯 Mg 中应用均未见报道. 本文采用添加少量自制  $\text{Al-Al}_4\text{C}_3$  细化剂和施加超声场对纯 Mg 进行处理, 分别考察了这 2 种细化方法对纯 Mg 铸态组织的影响, 并研究了 2 种方法同时作用下的细化效果, 探讨相关细化机理.

## 1 实验方法

采用 Al 粉 (粒径为  $50\ \mu\text{m}$ , 纯度为  $99.8\%$ ) 和石墨粉 (粒径为  $50\ \mu\text{m}$ , 纯度为  $99.6\%$ ), 按化学计量法进行配比, 用粉末冶金法合成  $\text{Al-Al}_4\text{C}_3$  晶粒细化剂, 以工业纯 Mg (纯度为  $99.50\%$ ) 作为细化对象. 将其置于坩埚电阻炉中熔炼, 采用  $\text{SF}_6+\text{CO}_2$  混合气体保护.  $\text{Al-Al}_4\text{C}_3$  细化剂加入量 (质量分数) 分别为  $0.3\%$ ,  $0.6\%$  和  $1.0\%$ . 升温至  $680\ \text{C}$  保温一段时间, 然后向熔体中压入  $\text{Al-Al}_4\text{C}_3$  细化剂并对熔体搅拌, 用同样方法浇注了添加  $1.0\%$  (质量分数) 纯 Al 的纯 Mg 铸锭. 保温  $10\ \text{min}$  后将熔体浇入金属模具, 在铸锭中心部位取样进行组织观察. 宏观低倍观察和偏振光观察试样分别采用  $3\ \text{g}$  苦味酸 +  $50\ \text{mL}$  酒精 +  $5\ \text{mL}$  蒸馏水 +  $2.5\ \text{mL}$  冰乙酸和  $6.5\ \text{g}$  苦味酸 +  $100\ \text{mL}$  酒精 +  $10\ \text{mL}$  蒸馏水 +  $5\ \text{mL}$  冰乙酸进行蚀刻. 利用 Leica DMR

数字金相显微镜 (OM) 及 OLYMPUS SZX16 体式显微镜 (OM) 对合金组织进行观察, 利用截线法并借助 Image-tool 软件对晶粒尺寸进行分析, 对  $\text{Al-Al}_4\text{C}_3$  的细化机理进行研究.

超声实验装置如图 1 所示. 实验材料为工业纯 Mg. 超声场的频率为  $(20\pm 2)\ \text{kHz}$ , 超声发生器功率  $0—2\ \text{kW}$  连续可调. 功率调节误差为  $\pm 10\ \text{W}$ . 在  $680\ \text{C}$  下进行实验, 分别研究了不同施振功率、施加连续超声及脉冲超声时纯 Mg 的细化效果. 最后对试样取样 (径向) 及对试样横截面 (轴向) 的凝固组织进行分析.

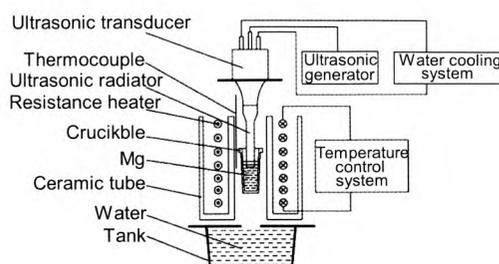


图 1 超声处理实验装置图

Fig.1 Schematic diagram of the experiment arrangement of ultrasonic treatment

## 2 实验结果

图 2 为纯 Mg 加入不同量  $\text{Al-Al}_4\text{C}_3$  细化剂后的 OM 像. 由图可见, 未加入  $\text{Al-Al}_4\text{C}_3$  时, 纯 Mg 凝固的晶粒生长带有明显的取向性, 柱状晶发达 (图 2a). 在纯 Mg 中加入  $\text{Al-Al}_4\text{C}_3$  后, 其铸态组织发生了明显改变, 随着加入量的不断增加, 组织逐步细小 (图 2b—d), 当加入  $1.0\%$  的  $\text{Al-Al}_4\text{C}_3$  时, 晶粒细小均匀, 圆整球化, 平均晶粒尺寸为  $106\ \mu\text{m}$  (图 2d). 当加入  $1.0\%$  的纯 Al 时, 纯 Mg 晶粒有所细化, 但与加入质量分数  $1.0\%$  的  $\text{Al-Al}_4\text{C}_3$  细化剂的纯 Mg 组织 (图 2d) 比较, 枝晶发达, 晶粒粗大, 均匀性较差 (图 2e).

图 3 为纯 Mg 熔体在液相线以上  $10\ \text{C}$  施加不同功率超声处理后的 OM 像. 由图可见, 未进行超声处理时, 纯 Mg 的晶粒生长带有明显的取向性, 柱状晶发达, 几乎贯穿表皮细晶区至中心 (图 3a). 当超声施振功率为  $450\ \text{W}$  时, 柱状晶开始熔断, 组织有所细化, 但均匀性较差 (图 3b). 当超声施振功率为  $600\ \text{W}$  时, 柱状晶大量熔断, 组织进一步细化 (图 3c). 当超声施振功率为  $1000\ \text{W}$  时, 柱状晶开始长大, 但晶粒仍比未施加超声场时细小 (图 3d).

图 4 为连续超声、脉冲超声和机械搅拌对纯 Mg 熔体处理后的 OM 像. 纯 Mg 未经处理时, 凝固组织呈现典型的铸态三晶区特征 (图 4a). 纯 Mg 熔体经  $800\ \text{W}$  连续超声处理  $1\ \text{min}$  后晶粒生长具有明显的取向性, 由铸锭中心 (超声变幅杆) 向边部生长 (图 4b). 纯 Mg 熔体经  $986\ \text{W}$  脉冲超声处理  $1\ \text{min}$  后晶粒的取向性被破坏. 局

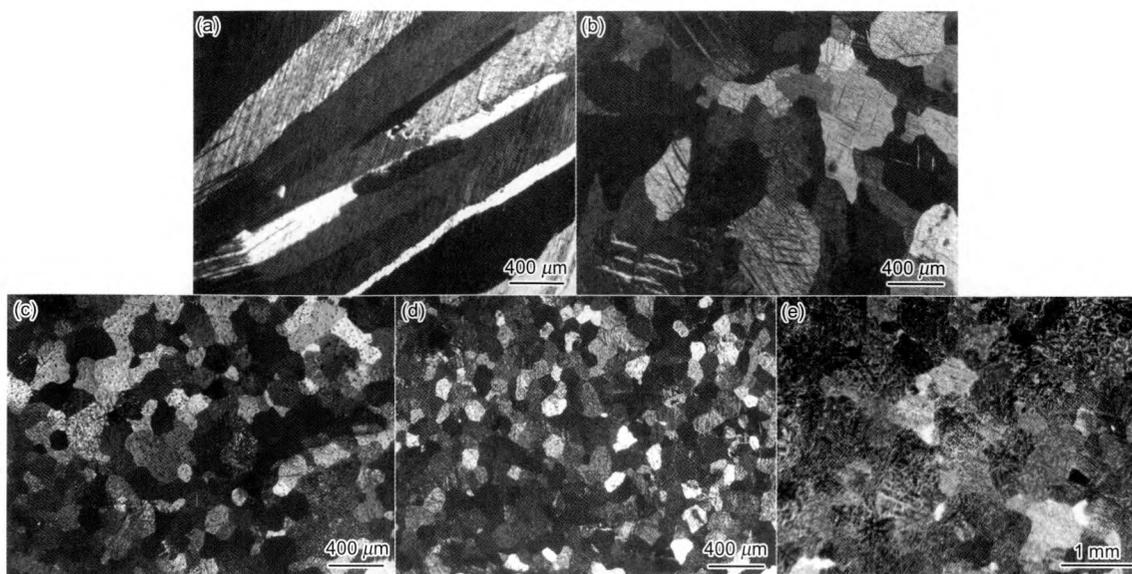


图 2 不同 Al-Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 添加量的纯 Mg 铸态组织

Fig.2 As-cast microstructures of pure Mg (a), and to which 0.3%Al-Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> (b), 0.6%Al-Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>(c), 1.0%Al-Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>(d) and 1.0%Al (e) added

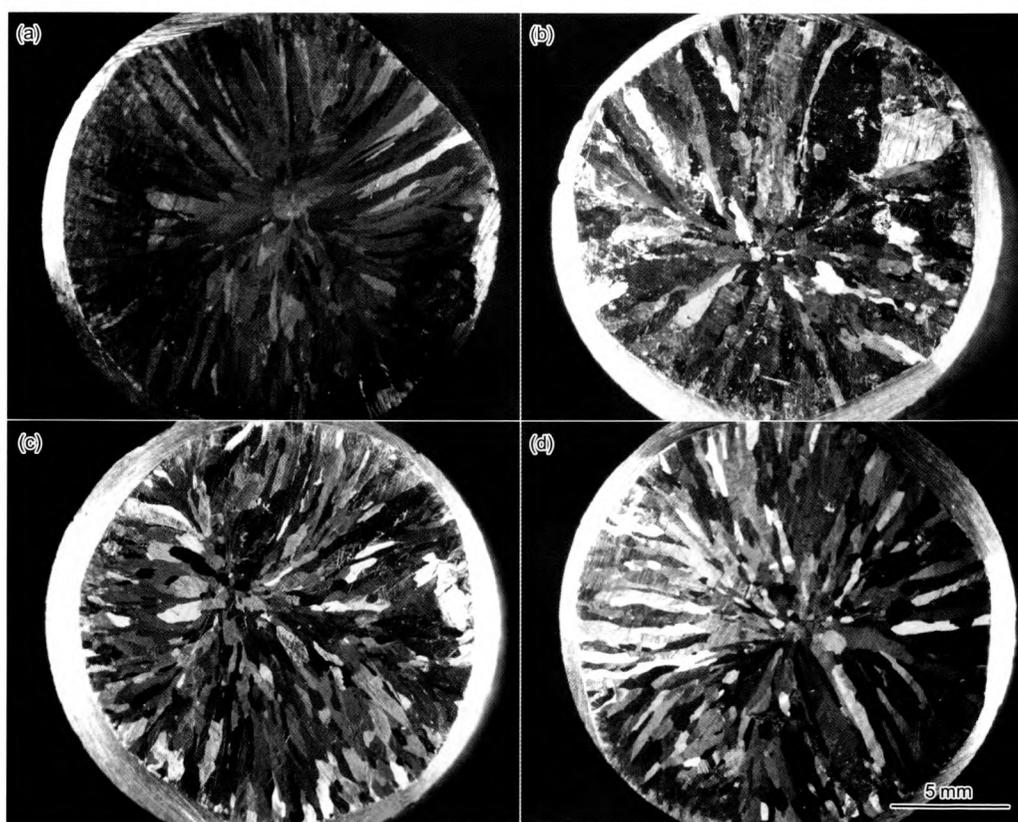


图 3 不同施振功率下的纯 Mg 凝固组织

Fig.3 Microstructures of pure Mg after being processed by ultrasound of 0 W (a), 450 W (b), 600 W (c) and 1000 W (d)

部晶粒细小, 均匀性较差 (图 4c). 纯 Mg 熔体经机械搅拌 1 min 后在搅拌杆底部区域晶粒细小, 但搅拌杆的径向方向柱状晶粗大 (图 4d).

图 5 为纯 Mg 熔体中加入 1.0%Al-Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 细化剂并

施加连续超声的 OM 像. 在 680 °C 时纯 Mg 晶粒趋于圆整, 细小均匀 (图 5a). 纯 Mg 在 710 °C 下施加功率为 883 W 连续超声并加入 1.0%Al-Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 细化剂后, 组织进一步细化, 生成大量细小晶粒, 但均匀性较差 (图 5b).

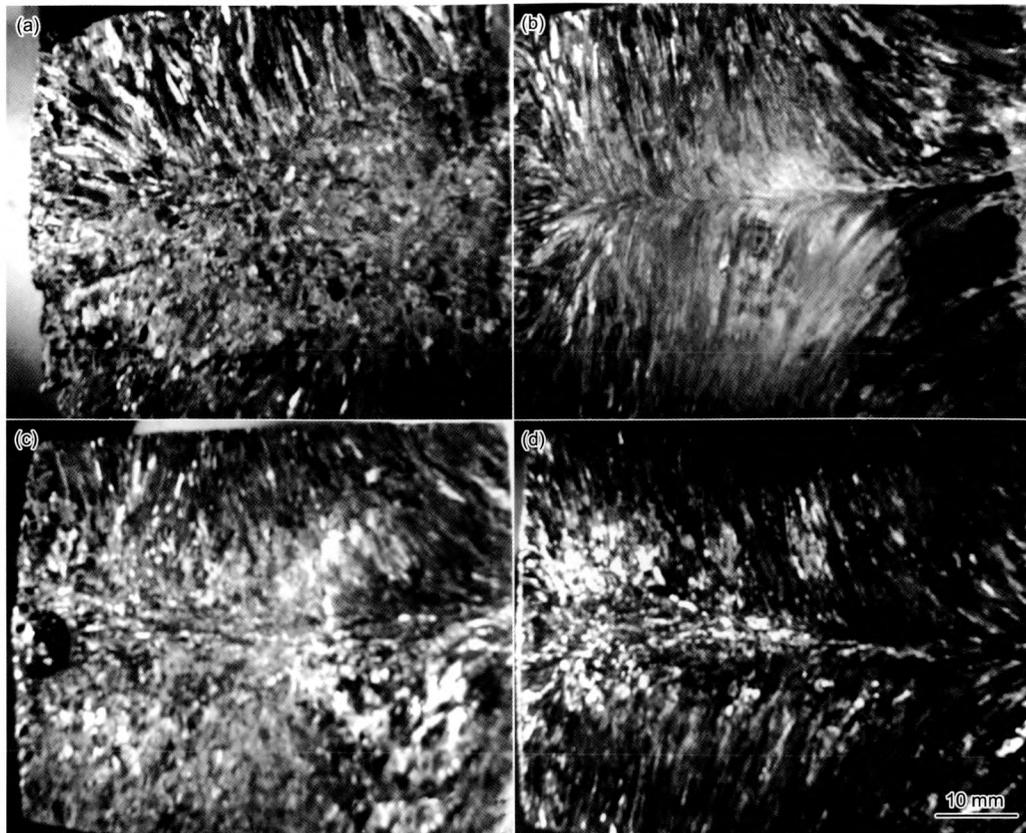


图 4 不同处理方式下纯 Mg 凝固组织宏观照片

Fig.4 Microstructures of pure Mg (a), after being processed by 800 W continuous ultrasound for 1 min (b), by 986 W impulse ultrasound for 1 min (c) and by mechanical rabbling for 1 min (d)

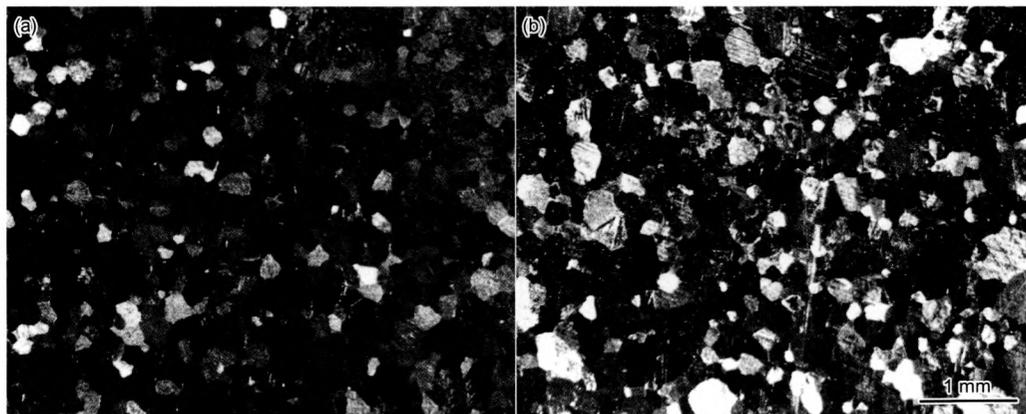


图 5 超声与细化剂共同作用下纯 Mg 凝固组织宏观照片

Fig.5 Microstructures of pure Mg to which 1.0%Al-Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> added after being processed by ultrasound at 608 °C (a) and by 883 W continuous ultrasound at 710 °C

### 3 分析讨论

#### 3.1 Al-Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 对纯 Mg 的细化

体系的总能  $E_s$  可表达为<sup>[12]</sup>

$$E_s = \sum E_l \tag{1}$$

$$E_l = \sum_{\alpha} \int_{-\infty}^{E_F} E n_{\alpha l}(E) dE \tag{2}$$

式中,  $E_s$  为总能;  $E_l$  为  $l$  格点的格位能;  $E$  为能态变量, 其 0 点取在无穷远处;  $n_{\alpha l}$  为  $l$  格点  $\alpha$  轨道的态密度.  $E_F$  为 Fermi 能级, 可通过下式确定:

$$Z = \sum_l \left[ \sum_{\alpha} \int_{-\infty}^{E_F} n_{\alpha l}(E) dE \right] \tag{3}$$

式中,  $Z$  为系统中所有原子在孤立状态时的总价电子数.

原子的结合能  $E_b$  定义为

$$E_b = E_s - E_{\text{self}} \quad (4)$$

式中,  $E_{\text{self}}$  为计算中考虑的区域所有原子孤立时的能量. 用此方法计算出的  $\alpha$ -Mg 与 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 的原子结合能分别为 -84.83750 和 -117.60537 eV, 可见 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 的原子结合能远低于相应的  $\alpha$ -Mg 相. 原子的结合能是系统总能与孤立原子本身具有的能量和之差, 即孤立原子结合成为原子集团后因原子间的相互作用产生的附加能量. 结合能影响着原子集团的结合强度, 结合能低 (绝对值大) 则破坏这种结合外界需施加的能量大, 结构不容易被瓦解, 而高结合能 (绝对值小) 导致原子集团容易解体. 由于 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 的原子结合能远低于相应的  $\alpha$ -Mg 相, 从能量观点来看, Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 的熔点高稳定性好, 在 Mg 合金凝固时, Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 在 Mg 熔体中产生大量的高稳定性的晶核.

纯 Mg 的凝固组织为典型的柱状晶, 自表皮贯穿至中心, 当加入 1.0%Al-Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 细化剂后, 由于其中含有大量的 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 质点, 在形核过程中作为异质核心, 能大幅提高形核率, 使晶粒明显细化. Al 作为主要合金元素, 通过固溶强化和形成沉淀析出相, 在纯 Mg 熔体中同样具有细化晶粒的作用. 因此本文比较了加入 1.0% 纯 Al 后的工业纯 Mg 凝固组织 (图 2e).  $\alpha$ -Mg 晶粒虽有细化, 但枝晶发达, 并没有形成均匀的组织, 可见, 只有加入 1.0%Al-Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 细化剂后, 纯 Mg 晶粒才能由毫米级细化到 106  $\mu\text{m}$ .

### 3.2 超声对纯 Mg 的细化

Yasuda 等<sup>[13]</sup> 提出空化效应产生的小气泡能够促进异质形核, 而 Komarov 等<sup>[11]</sup> 总结出空化泡和声流效应打断的枝晶臂碎片会作为形核核心促进形核. 在本实验中 Komarov 等<sup>[11]</sup> 的细化机理最有可能发生. 如图 3b 所示, 在柱状晶的末端产生了少量的细晶组织, 这是由于在超声作用下, 声流作用在金属熔体中形成强制对流. 强制对流的冲刷作用及热能作用能打断 (冲断和熔断) 凝固前沿形成的枝晶, 碎断的枝晶又成为新的晶核, 增加了熔体形核率; 同时强制对流还将凝固前沿及敞露液面处的悬浮晶核带到熔体内部, 增加了熔体的形核率. 图 3c 的结晶组织进一步证实了这一解释. 随着超声功率的增加, 变幅杆表面附近的声强升高, 空化效应更剧烈, 所以这里的 Mg 液获得了比熔体内部更大的过冷, 同时声流对熔体的搅动作用也更强烈, 是形核最可能发生的区域. 由于超声振动的原因, 很难在变幅杆附近形成稳定的凝固层, 晶核产生后被簇射出去, 有的重新熔化, 有的则长大形成新的晶粒. 而当超声功率进一步加大时, 晶粒有长大的趋势 (图 3d), 这是因为纯 Mg 在凝固过程中, 之前由超声辅助形成的晶核由于超声功率增加而产生的过多的热效应又被重新熔化, 合并长大, 故细化效果没有之前好.

### 3.3 振动方式对纯 Mg 细化的影响

根据晶粒破碎理论<sup>[14,15]</sup>, 对金属熔体施加超声场,

空化产生的机械冲击波及热脉冲将使粗大的晶粒破碎, 形成大量的晶核, 使晶粒球化、细化. 但图 4 实验现象却无法用空化破碎理论合理解释. 超声作用与机械搅拌作用的纯 Mg 晶粒生长方向相同, 这表明在实验过程中, 超声变幅杆与搅拌棒在高温熔体中均相当于“冷铁”, 起到局部过冷的作用, 从而使晶粒生长方向由铸锭心部向边部生长, 这种晶粒反向生长的现象可以得到很好解释. 而晶粒的破碎主要是枝晶的熔断脱落, 由于潜热的存在, 需要大量的热量对枝晶的根部重熔, 而空化泡破碎产生的高温、高压作用于瞬间微小的局部区域, 其作用效果很难使大量粗大枝晶熔断. 因此无法形成大量的结晶核心使晶粒球化、细化. 同时声流效应可以促进熔体的流动, 有利于一些细小枝晶的打断重熔, 形成新的晶核. 故此, 在柱状晶的间隙伴有少量细晶出现, 这可以理解为以小枝晶重熔为核心生长的等轴晶粒被超声波簇射出去, 最后停留在超声变幅杆的轴向周围 (图 4b). 而机械搅拌并没有轴向力, 故此生成的细小晶粒随搅拌杆的搅动脱落于铸锭底部, 故在铸锭底部形成了少量的细晶区 (图 4d). 综上可知, 超声场作用于熔体时, 在声流的搅拌作用下, 细小枝晶被打断并被簇射出去, 分布于熔体中, 因此凝固后基体晶粒柱状晶周围有细小的等轴晶. 而空化泡破碎产生的高温、高压效应难以使枝晶重熔破碎, 对于晶粒的细化、球化不起主要作用.

### 3.4 超声与 Al-Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 同时作用的细化机理

按 Eskin<sup>[9]</sup> 的杂质活化成为形核核心的理论来解释功率超声与细化剂共同作用的实验现象, 可以准确地说明为何在等轴晶区之上还会出现大量的细晶组织 (图 5b). 根据凝固原理, 后凝固的区域被“活化”的杂质应该更多, 形成更多的晶核, 从而获得更细小的晶粒. 从图 5b 可以看出, 大量细小晶粒分布于相对尺寸较大的晶粒周围, 尺寸较大的晶粒具有典型的优先形核特征. 这些晶粒合并长大, 作为结晶的骨架, 形成多个结晶小熔池, 由于 Al-Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 细化剂中含有大量高熔点的 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 质点, 相当于被“活化”的“杂质”, 被纯 Mg 熔体推入形成的小熔池中, 大量弥散的 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 质点作为异质形核的核心, 大幅提高形核率, 形成大量细小的等轴晶. 根据这一分析, 图 5b 中尺寸较大晶粒包围着大量细小晶粒的现象可以得到很好的解释. 从形核质点的面积分数来看, 只添加细化剂时, 形核质点的面积分数为 0.95%, 当超声与细化剂共同作用时, 形核质点的面积分数为 2.07%, 由此可以证明, 超声对熔体中的 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 质点起到活化的作用, 见图 6. 另外, 当超声作用于纯 Mg 熔体时, 声流效应的强制对流及空化泡的崩塌、破裂对 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 质点的表面具有一定的清洗作用, 除去附着在表面的 C 颗粒等杂质, 使得 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 质点的表面能升高, 断键数增加, 促使 Mg 原子更易于与 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 键合, 降低表面能, 从而大大提高 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 质点的形核效率, 形成更多的晶核. 同时强制对流将凝固前沿形成的晶核带到温度较高的熔体中部, 减小晶核生长速度, 抑制晶核的

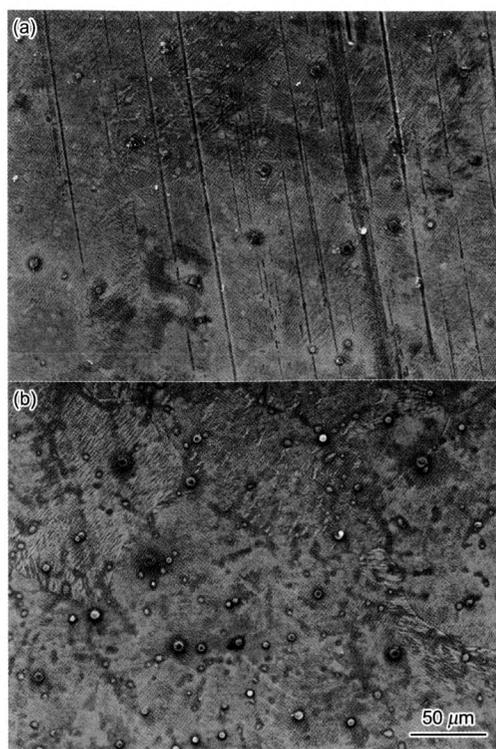


图6 只添加细化剂及超声与细化剂共同作用下纯 Mg 凝固组织的 SEM 像

Fig.6 SEM images of pure Mg to which only 1.0%Al-Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> refiner added (a) and 1.0%Al-Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> refiner added after being processed by ultrasound of 883 W (b)

长大.

#### 4 结论

(1) 向纯 Mg 熔体中加入 1.0%Al-Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>(质量分数)细化剂时可有效细化 α-Mg 晶粒, 晶粒平均尺寸由毫米级降至 106 μm.

(2) 功率超声可以细化纯 Mg 晶粒. 空化泡破碎产生的过冷对形核具有促进作用, 空化泡的破裂及声流对熔体的搅动使得细小枝晶破碎, 形成新的晶核, 这一过程对形核起主要作用. 当施振功率为 600 W 时细化效果最好,

随施振功率的增加, 超声产生的热效应增强, 晶粒有粗化趋势.

(3) 超声与 Al-Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 细化剂共同作用于纯 Mg 熔体时, 可以显著细化晶粒. 超声对杂质具有“活化”作用, 大量 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 质点被推入后凝固的区域, 形成弥散的形核核心, 大幅提高形核率.

#### 参考文献

- [1] Kojima Y. *Mater Sci Forum*, 2000; 350-351: 3
- [2] Watanabe H, Tsutsui H, Mukai T, Ishikawa K, Okanda Y, Kohzu M, Hiqashi K. *Mater Sci Forum*, 2000; 350-351: 171
- [3] Yang M B, Pan F S, Li Z S. *Foundry*, 2005; 54: 314 (杨明波, 潘复生, 李忠盛. 铸造, 2005; 54: 314)
- [4] Avedesian M M, Baker H. *Magnesium and Magnesium Alloys*. Materials Park, Ohio: ASM Int, 1999: 53
- [5] Mukai T, Watanabe H, Higashi K. *Mater Sci Forum*, 2000; 350-351: 159
- [6] Tamura Y, Kono N, Motegi T, Sato E. *J Jpn Inst Light Met*, 1998; 48(4): 185
- [7] Bramfitt B L. *Metall Trans*, 1970; 1: 1987
- [8] Eskin G I. *Ultrasonic Treatment of Light Alloy Melts*. Amsterdam: Gordon and Breach, 1998: 114
- [9] Eskin G I. *Ultrason Sonochem*, 2001; 8: 319
- [10] Chen F. *PhD Thesis*, Southeast University, NanJing, 1991 (陈 锋. 东南大学博士学位论文, 南京, 1991)
- [11] Komarov S V, Kuwabara M, Abramov O V. *ISIJ Int*, 2005; 45: 1765
- [12] Xiao S X, Wang C Y, Chen T L. *The Application of the Discrete Variational Method in the Density Functional Theory to Chemistry and Materials Physics*. Beijing: Science Press, 1998: 92 (肖慎修, 王崇愚, 陈天朗. 密度泛函理论的离散变分方法在化学和材料物理学中的应用. 北京: 科学出版社, 1998: 92)
- [13] Yasuda K, Saiki Y, Kubo T, Kuwabara M, Yang J. *Jpn J Appl Phys*, 2007; 46: 4939
- [14] Campbell J. *Int Metall Rev*, 1981; 26: 71
- [15] Schaefer R J, Glicksman M B. *Trans AIME*, 1967; 239: 257