

# 高能超声对 Al5Ti1B 中间合金组织和细化行为的影响

韩延峰, 李克, 王俊, 孙宝德

(上海交通大学 金属基复合材料国家重点实验室, 上海 200030)

**摘要:** 在 Al5Ti1B 中间合金的制备和重熔过程中引入高能超声处理, 研究了其对中间合金组织和细化效果的影响。结果发现: 在市售 Al5Ti1B 重熔过程中施加超声处理, 可以显著改善合金组织和细化作用; 制备过程中施加超声处理可以加速氟盐和铝熔体间反应的进行, 均匀化组织, 提高细化效果; 中间合金制备及凝固过程联合超声处理, 不仅可以改变  $TA_{15}$  相的形貌, 而且改变了  $TB_2$  聚集团的形态, 使其变为疏松的鱼卵状, 粒子之间不再存在粘连现象, 中间合金的细化效果进一步提高。

**关键词:** Al5Ti1B 中间合金; 高能超声; 细化

**中图分类号:** TG146.2<sup>1</sup> **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-5053(2005)05-0008-07

众所周知, 在铝工业中, 细小等轴晶组织可以显著提高铸件的力学性能, 保证材料整体性能的均匀性, 改善机加工性能, 减小热裂倾向, 因此, 晶粒细化具有重要的现实意义<sup>[1,2]</sup>。目前, 工业中普遍采用向铝熔体中添加 AlTi 和 AlTiB 中间合金以达到晶粒细化的目的, 许多研究者对不同 Ti/B 比的 AlTiB 中间合金进行了大量的研究, 发现其中的 Al5Ti1B 中间合金对纯铝及大多数的铝合金来说是最为有效的细化剂<sup>[3-7]</sup>。关于 AlTiB 中间合金的细化机理存在多种模型, 其中比较合理的是“二重形核理论”, 其核心是中间合金中具有  $TA_{15}$  层的  $TB_2$  粒子在细化过程中起作用<sup>[1,8]</sup>, 故 Al5Ti1B 中间合金组织中  $TB_2$  粒子及  $TA_{15}$  相的尺寸、形状及分布状态在很大程度上决定着中间合金的细化效果, 尺寸细小、均匀分布的团块状  $TA_{15}$  相以及弥散分布的孤立  $TB_2$  粒子都有助于提高中间合金的细化效果。因此, 通过一定的手段控制中间合金中  $TB_2$  粒子及  $TA_{15}$  相的尺寸、形状及分布状态, 使其达到理想状态将有助于细化效果的提高。

在金属或合金的凝固过程中施加振动可以改善

其组织结构、提高机械性能, 超声振动用于处理液态金属的研究在上世纪中期就已经开始, 随着大功率超声波发生器的出现, 超声振动得以在铸造领域实现应用<sup>[9,10]</sup>。超声波是一种高频声波, 在液体中传播时, 产生声空化和声流两种效应, 在局部发生高温高压现象, 并在液体中产生空化和搅拌作用, 从而对其结晶过程产生影响。目前, 国内外这方面的研究主要集中在超声对低熔点合金铸态组织的细化及提高复合材料外加颗粒增强相的润湿性<sup>[11-14]</sup>, 而超声在 AlTiB 中间合金应用方面鲜有报道, 对 AlTiB 中间合金施加超声处理有可能改善组织中  $TA_{15}$  相和  $TB_2$  粒子的形态, 从而提高中间合金的细化效果。本研究在 AlTiB 中间合金的制备及重熔过程中施加了高能超声处理, 考察了超声对 Al5Ti1B 中间合金组织和细化效果的影响。

## 1 试验方法

### 1.1 试验材料及设备

试验用原材料有纯度 99.7% 的工业纯铝, 纯度 98.0% 的工业用  $KBF_4$ , 纯度为 99.0% 的工业用  $K_2TF_6$ , 国内市售 Al5Ti1B 铸锭, 0.5% 氢氟酸, 王水。试验用设备仪器有 5kW 井式坩埚电阻炉, 功率为 1kW、频率为 20kHz 振幅为 25μm 的冶金用超声波发生器, 其辐射的声能密度达到  $100W/cm^2$ , 石墨粘土坩埚, 工业陶瓷坩埚, 雷诺标准高尔夫 T 型模。分析测试设备有 OLYMPUS 显微镜, LECO-IA32 图像分析系统, JCSA-733 扫描电镜。

收稿日期: 2004-09-05; 修订日期: 2004-11-08

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) (2002AA336072); 上海市优秀学科带头人计划 (03XD14009); 上海市科委纳米技术专项 (No. 0352mm054)

作者简介: 韩延峰 (1979-), 男, 博士研究生, (E-mail) yfhan@sjtu.edu.cn

## 1.2 试验过程

共进行三类情况试验, 第一种情况是在 750℃ 下, 将市售 Al5Ti1B 中间合金在工业陶瓷坩锅中重熔, 保温 15min 后, 将变幅杆由上部液面引入, 垂直施振, 超声处理 1min 然后浇入金属模具中。第二种情况是利用  $KBF_4$  和  $K_2TiF_6$  在电阻炉中自行制备 Al5Ti1B 中间合金, 制备温度为 820℃, 反应时间 60min 在制备过程中, 间隔 10min 施加程度不同的超声处理, 然后扒渣浇注。最后一种情况是向铝熔体中加入  $KBF_4$  和  $K_2TiF_6$  混和盐 10min 后, 超声处理 2min 静置保温 50min 且扒渣后施加超声处理直至中间合金最终凝固。截取所制备的中间合金, 制

备金相试样, 用 0.5% 氢氟酸腐蚀后进行金相及扫描电镜观察。Al5Ti1B 中间合金对工业纯铝的细化工艺为: 将纯铝在 730℃ 下熔化, 保温 10min 然后加入 0.2wt.% 的 Al5Ti1B 中间合金, 充分搅拌, 保温 15min 浇入雷诺标准高尔夫 T 型模。在距试样底面 5mm 处剖开, 磨平后用王水深腐蚀, 进行宏观组织观察。

## 2 试验结果

### 2.1 Al5Ti1B 重熔过程施加超声处理的作用

市售 Al5Ti1B 中间合金重熔过程中, 施加超声处理前后的组织形貌如图 1 所示。

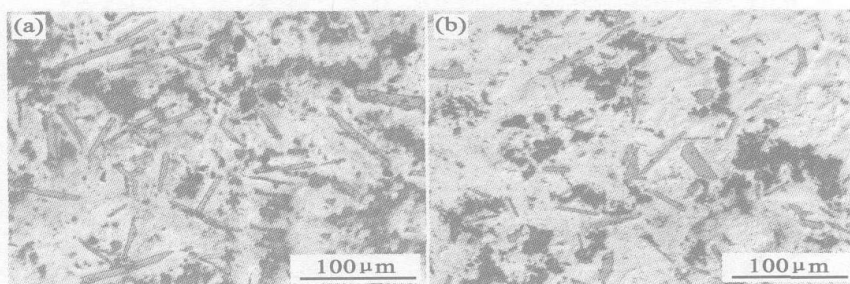


图 1 重熔过程超声处理对市售 Al5Ti1B 中间合金组织的影响 (a) 未施加超声处理; (b) 施加超声处理

Fig 1 Influence of ultrasonic treatment applied in remelting on the microstructure of commercial Al5Ti1B (a) no ultrasonic treatment; (b) applying ultrasonic treatment

未施加超声处理时, 如图 1(a) 所示, 中间合金组织中的  $TAl_3$  相全部呈现粗大的长条状, 尺寸大都在 100μm 以上, 数量也比较多, 而且组织中  $TB_2$  粒子的聚集现象也比较严重, 以黑色的聚集团形式出现在组织中。而在重熔过程中施加 1min 超声处理后, Al5Ti1B 中间合金组织有了比较明显的变化, 如图 1(b) 所示, 组织中的  $TAl_3$  相尺寸有所减小, 大部分呈现 50μm 左右的短杆状, 甚至出现团块状的  $TAl_3$  相, 而  $TB_2$  粒子的团聚现象也有一定程度的减轻, 组织中黑色的聚集团明显减少, 而小聚集团的分布也比较均匀。经重熔超声处理前后的市售 Al5Ti1B 中间合金细化的工业纯铝宏观组织如图 2 所示。图 2(a) 为未添加晶粒细化剂时工业纯铝的宏观组织, 由图可见, 凝固后组织呈现明显的柱状晶形貌。图 2(b) 和 (c) 分别为经超声处理前后市售 Al5Ti1B 中间合金细化后的工业纯铝宏观组织, 从图中可以看出, 经过细化后, 组织中的晶粒全部由原先的柱状晶变为细小的等轴晶, 而且图 2(c) 中的晶粒尺寸明显比图 2(b) 中的要小, 这说明经过超声处理后的晶粒细化剂对工业纯铝的细化效果较未经处理的情况明显提高。

### 2.2 Al5Ti1B 制备过程施加超声处理的作用

按常规工艺方法所制备 Al5Ti1B 中间合金的扫描电镜形貌 (SEM) 如图 3(a) 所示。可以看出, 组织中的大部分  $TAl_3$  相为尺寸在 10~20μm 的团块状, 只有少量的  $TAl_3$  相呈现尺寸大小不一的短杆状。组织中  $TB_2$  粒子仍存在一定的团聚现象, 但聚集团的尺寸不是很大, 而且从整体上看,  $TB_2$  粒子的分布还是比较均匀的。制备开始 10min 时施加 2min 超声处理后所制备的 Al5Ti1B 中间合金的 SEM 如图 3(b) 和 (c) 所示, 中间合金组织中的  $TAl_3$  相全部呈现 20μm 以下的块状, 没有出现粗大的长条状  $TAl_3$  相, 而且所有的  $TAl_3$  相在整个组织中均匀分布。同时  $TB_2$  粒子的聚集程度有所降低, 但还是呈聚集状分布, 从图 3(c) 可见,  $TB_2$  粒子的尺寸都比较细小, 大多在 1μm 左右, 但粒子的轮廓不清晰, 大部分  $TB_2$  粒子都粘连在一起呈现珊瑚状。由此可见, 在制备初期施加超声处理会对所制备的中间合金组织产生明显的影响。整个制备过程中经过间隔为 10min 的六次 2min 超声处理后的 Al5Ti1B 中间合金的 SEM 如图 3(d) 所示, 与图 3(b) 比较可以发现, 中间合金组

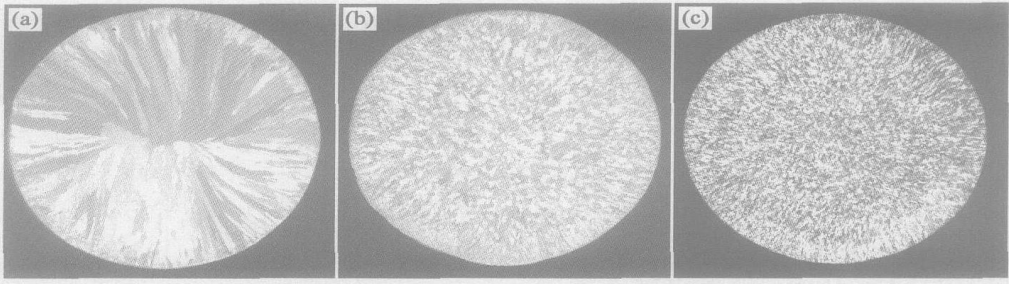


图 2 重熔过程超声处理对市售 A+5Ti+1B 中间合金细化效果的影响

(a) 未添加细化剂; (b) 添加市售 A+5Ti+1B 中间合金; (c) 添加超声处理后的市售 A+5Ti+1B 中间合金

Fig 2 Influence of ultrasonic treatment applied in remelting on grain refining performance of commercial A+5Ti+1B

(a) no grain refiner (b) addition of commercial A+5Ti+1B (c) addition of commercial A+5Ti+1B after ultrasonic treatment

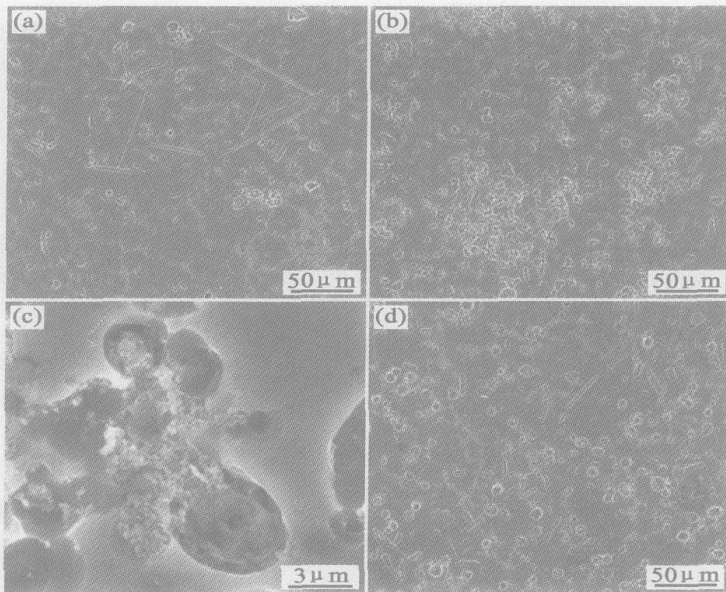


图 3 制备过程超声处理对 A+5Ti+1B 中间合金组织的影响 (a) 未施加超声处理; (b), (c) 在制备开始后 10min 时超声处理 2min; (d) 从制备开始每隔 10min 超声处理 2min

Fig 3 Influence of ultrasonic treatment applied in preparation on the microstructure of A+5Ti+1B

(a) no ultrasonic treatment (b), (c) 2 minutes ultrasonic treatment at 10 minutes after the beginning of preparation; (d) 2 minutes ultrasonic treatment in every 10 minutes of the preparation

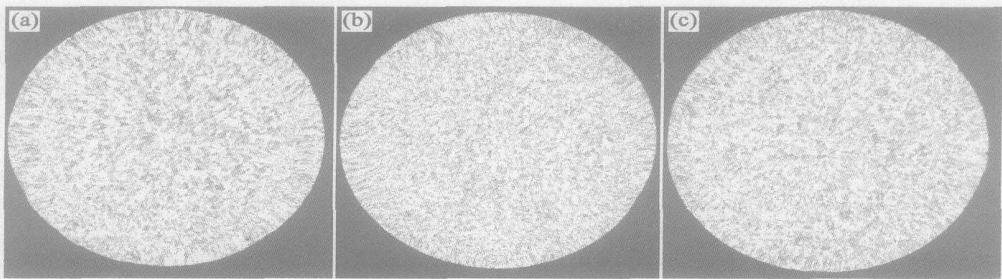


图 4 制备过程超声处理对 A+5Ti+1B 中间合金细化效果的影响 (a) 添加常规 A+5Ti+1B 中间合金; (b) 添加制备初期超声处理的 A+5Ti+1B 中间合金; (c) 添加制备过程六次间断超声处理的 A+5Ti+1B 中间合金

Fig 4 Influence of ultrasonic treatment applied in preparation on the grain refinement of A+5Ti+1B

(a) addition of common A+5Ti+1B (b) addition of A+5Ti+1B after ultrasonic treatment in the beginning of preparation; (c) addition of A+5Ti+1B after 6 times discontinuous ultrasonic treatment

织中各相的形态基本上变化不大,但细小团块状  $TAl_3$  相有向小短杆状转变的趋势,尺寸也略有增大,而且  $TAl_3$  相的数量也有所减少。工业纯铝经过上述三种 A15Ti1B 中间合金细化后的宏观组织如图 4 所示,比较图 4(a), (b) 和 (c) 可以发现,用超声下所制备 A15Ti1B 中间合金细化后的工业纯铝的晶粒尺寸要明显小于用常规工艺制备 A15Ti1B 中间合金细化后的情况。但制备时多次超声处理所得到的 A15Ti1B 中间合金对工业纯铝的细化效果相对于制备初期施加超声处理所得中间合金的细化效果反而有下降的趋势。

### 2.3 A15Ti1B 制备及随后凝固过程中施加超声的作用

在制备开始 10min 时施加 2min 超声处理,并在整个凝固过程中施加超声处理直至完全凝固,所得的 A15Ti1B 中间合金的 SEM 如图 5 所示。由图可

见,中间合金组织中的  $TAl_3$  相全部呈  $20\mu\text{m}$  以下的小块状,而且在整个组织中均匀分布。组织中的略有聚集的小团状  $TB_2$  粒子均匀地分布在整个组织中,从图 5(b) 中还可以发现,组织中的  $TB_2$  粒子尺寸大多在  $1\mu\text{m}$  左右,与图 3(c) 相比,  $TB_2$  粒子的轮廓清晰,形状为规则的多边形,虽然是呈团聚状,但粒子之间没有存在粘连现象,每个粒子基本上呈孤立状存在。工业纯铝经此中间合金细化后的宏观组织如图 6 所示,经过细化后晶粒呈非常细小的等轴状(如图 6(b)),通过与图 2 和图 4 比较发现,用反应初期及凝固过程中超声处理制备 A15Ti1B 中间合金细化的工业纯铝是所有试验中细化效果最好的,也就是说,反应初期施加超声处理结合凝固过程中施加超声处理可以显著地改善 A15Ti1B 中间合金对工业纯铝的细化效果。

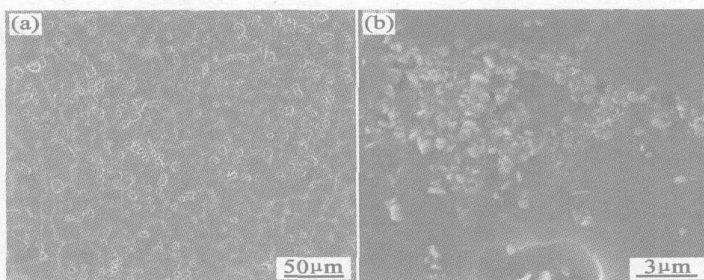


图 5 反应初期 (a) 及凝固过程中 (b) 施加超声处理后所制备 A15Ti1B 中间合金的组织形貌  
Fig 5 Microstructure of A15Ti1B after ultrasonic treatment in fabrication (a) and solidification (b)

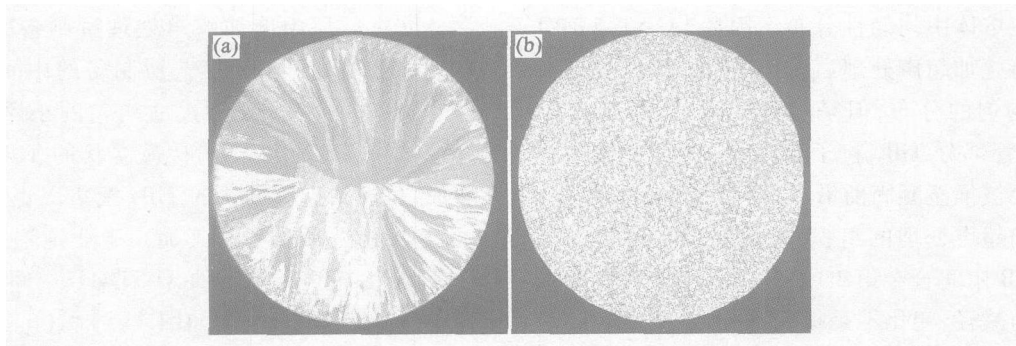


图 6 反应初期及凝固过程中施加超声处理对 A15Ti1B 中间合金细化效果的影响

(a) 未添加细化剂; (b) 添加反应初期及凝固过程中施加超声处理所制备 A15Ti1B 中间合金

Fig 6 Influence of ultrasonic treatment in fabrication and solidification on the grain refinement of A15Ti1B

(a) no grain refiner (b) addition of A15Ti1B after ultrasonic treatment in fabrication and solidification

## 3 分析讨论

高能超声在液体中传播时,一般认为会产生两种基本的效应:声空化效应和声流效应。超声波在液体中传播时,液体分子受到周期性交变声场的作

用,在声波的稀疏相内,液体受到拉应力,若声压值足够大,则液体被拉裂从而形成空化泡或空穴,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,从而在液体内部产生瞬时的局部高温高压区,这就是通常说的声空化效应。通过计算可

以发现,当超声频率为 20kHz,输出功率为 1kW 时,声空化泡崩溃所产生的空化作用足以在熔体局部产生  $10^4\text{K}$  和  $100\text{MPa}$  左右的高温高压区<sup>[15]</sup>。另外,超声波在流体中的有限振幅衰减使液体内形成一定的声压梯度,从而形成一个流体的喷流,此喷流直接离开换能器端面并在整个流体中引起一个整体环流,即声流效应,声流的流速可达到流体对流的 10~1000 倍<sup>[10]</sup>。

当在 Al5Ti1B 中间合金重熔过程中施加超声处理时,超声波声空化效应产生的局部高温高压现象,可以加快组织中  $\text{TiAl}_3$  相的溶解,使原先溶解不完全的  $\text{TiAl}_3$  小晶核彻底溶解,再加上声流效应产生的大幅度搅拌作用,超声处理后,熔体中的溶质 Ti 原子可以均匀的分布在整個熔体中。在熔体随后凝固过程中,  $\text{TiAl}_3$  晶核形成后继续生长时,由于 Ti 原子在整个熔体中均匀分布, Ti 原子的扩散距离增加,在相同的凝固速度下,  $\text{TiAl}_3$  相的生长就会受到抑制。因此,市售 Al5Ti1B 中间合金重熔超声处理后,原先组织中呈现粗大板条状的  $\text{TiAl}_3$  相被短杆状  $\text{TiAl}_3$  相所取代,如图 1。

而对于组织中的  $\text{TB}_2$  粒子来说,空化泡崩溃产生高压的同时,也会在附近区域产生同样级别的负压,该负压可以吸掉颗粒表面的气体、杂质和氧化物,使粒子的表面能升高,从而改善  $\text{TB}_2$  粒子与铝熔体之间的润湿性。空化效应产生的高温和高压还可以使熔体的表面张力降低,进一步改善粒子与熔体间的润湿性。同时声流效应引起的搅拌作用也会改善粒子在熔体中均匀性分布。因此,Al5Ti1B 中间合金重熔施加超声处理后,熔体中的  $\text{TB}_2$  粒子应当是比较均匀的分布,但是随后凝固时,随着  $\alpha\text{-Al}$  的生长,尽管部分  $\text{TB}_2$  粒子会被吞噬,而大部分的粒子还是会被推至凝固前沿,以聚集状存在。因此,相对于未加超声处理的组织,重熔超声处理后的市售 Al5Ti1B 中间合金组织中的  $\text{TB}_2$  粒子聚集现象只有轻微的减轻,变化不是很大,如图 1 所示。

市售 Al5Ti1B 中间合金经过重熔超声处理后对工业纯铝的细化效果有了明显的提高,如图 2 所示,究其原因是超声处理使组织中粗大长条状  $\text{TiAl}_3$  相向短杆状转变引起的,当含有短杆状  $\text{TiAl}_3$  相的 Al5Ti1B 中间合金加入工业纯铝后,尺寸小的  $\text{TiAl}_3$  相易于溶解,溶解后更加均匀分布在铝液中,从而为熔体中大量的  $\text{TB}_2$  粒子形成包覆层提供基础。

在 Al5Ti1B 制备过程中施加超声主要是影响氟盐与铝之间的反应,在反应开始 10min 施加 2min

超声处理时,由于超声波的声流和声空化效应,一方面在熔体中产生整体环流,使得 KBF<sub>4</sub> 和 K<sub>2</sub>Tf<sub>6</sub> 两种氟盐与铝熔体间的接触更加充分,另一方面产生局部高温高压区加速了反应的进程,两者联合作用可以使制备反应在短时间内充分进行。同时,超声施加时,所产生的交变振动作用又可以使反应生成的  $\text{TB}_2$  粒子迅速脱离反应区,抑制了粒子的进一步长大,剩余的游离态 Ti 原子也可以均匀分布在整個熔体中。因此,随后凝固时,组织中不会出现粗大长条状的  $\text{TiAl}_3$  相,而  $\text{TiAl}_3$  相则是以 10~20 $\mu\text{m}$  的团块状出现,如图 3(b)。而由于凝固过程中  $\alpha\text{-Al}$  生长引起的排斥作用,原先熔体中均匀分布大部分  $\text{TB}_2$  粒子还是会被推至一起呈粘连的珊瑚状分布,如图 3(c) 所示。在制备过程中施加多次超声处理所制备的 Al5Ti1B 中间合金组织与反应初期施加超声处理制备的中间合金相比,组织中  $\text{TiAl}_3$  相的数量有所减少,说明在反应初期施加 2min 超声处理即可使氟盐与铝液间的反应充分进行,再多次施加超声处理反应程度已无大的变化。多次超声处理不仅不能进一步改善中间合金的组织,反而由于声流的剧烈搅拌作用会把反应生成的熔渣卷入熔体内部,从而污染熔体。而且由于超声会在熔体中产生热效应,多次超声处理一定程度上会提高熔体的温度,从而使得熔体凝固时,  $\text{TiAl}_3$  相的结晶方式有所变化,产生由小团块状向小短杆状转变的趋势,如图 3(d) 所示。而且由于  $\text{TiAl}_3$  相尺寸的增加,相的数量也有所下降。

反应过程中施加超声处理所制备的 Al5Ti1B 中间合金相对于常规工艺所制备的中间合金,组织中的  $\text{TiAl}_3$  相完全变为尺寸均匀的小团块状,而且  $\text{TiAl}_3$  相的分布更加均匀,孤立状的  $\text{TB}_2$  粒子数量增加,呈现粘连珊瑚状的  $\text{TB}_2$  聚集团也变得略有疏松,这种组织形态利于其加入工业纯铝后的均匀分散。因此,超声下制备的 Al5Ti1B 中间合金的细化效果有了明显的改善,如图 4(a) 和 (b) 所示。由于制备过程中多次超声处理所制备的中间合金组织形态相对于反应初期一次超声处理的中间合金有所变差,所以其对工业纯铝的细化效果也有所降低,如图 4(b) 和 (c) 所示。

在反应初期施加 2min 超声处理,再在中间合金凝固时持续施加超声处理直至中间合金完全凝固,可以显著改善最终的凝固组织,如图 5。如上所述的原因,凝固后组织中的  $\text{TiAl}_3$  也是呈现均匀分布的 20 $\mu\text{m}$  下的小块状,而  $\text{TB}_2$  形态和分布则有明显的改善。在凝固过程中施加超声,由于声空化和声

流效应产生的强烈冲击波将会击碎初生和正在长大的  $\alpha$ -Al 晶体, 并会引起已凝固晶体的剧烈翻动, 从而改变凝固前沿的状态, 使得被生长的  $\alpha$ -Al 晶粒吞噬的  $TiB_2$  粒子数量显著增加。而且被推至晶粒间的  $TiB_2$  粒子团, 由于巨大的冲击波也会与未凝固熔体交织在一起, 完全凝固后, 粒子团中粒子之间也不会再粘连在一起, 而是呈现轮廓清晰的孤立状, 所有  $TiB_2$  粒子团以完全疏松的鱼卵状存在。具有小块状  $TiAl_3$  相和疏松鱼卵状  $TiB_2$  粒子团的此 Al<sub>5</sub>Ti<sub>3</sub>B 中间合金加入工业纯铝中后,  $TiAl_3$  迅速溶解,  $TiB_2$  粒子团很快分散开来, 最终在熔体中均匀分布, 其对工业纯铝的细化效果必然大幅度提高, 如图 6 所示。

#### 4 结论

(1) 在市售 Al<sub>5</sub>Ti<sub>3</sub>B 中间合金重熔过程中施加超声处理时, 声空化和声流效应加速粗大  $TiAl_3$  相的溶解, 增加了熔体中溶质 Ti 和  $TiB_2$  粒子的均匀性, 使得凝固过程中的  $TiAl_3$  相析出受到抑制, 形态变为短杆状, 而由于  $\alpha$ -Al 生长过程中的排斥作用,  $TiB_2$  粒子在最终凝固组织中仍以团聚状分布。重熔超声处理后细化效果的提高主要得益于  $TiAl_3$  相形态的转变。

(2) Al<sub>5</sub>Ti<sub>3</sub>B 制备过程中施加超声处理, 加速了氟盐与铝熔体间的反应, 改善了反应结束后熔体中溶质 Ti 与  $TiB_2$  粒子的均匀分布, 使得最终凝固组织中  $TiAl_3$  相分布更加均匀,  $TiB_2$  粒子以疏松粘连的珊瑚状存在, 提高了其对工业纯铝的细化效果; 制备过程中多次超声处理相对于反应初期施加一次超声处理所得中间合金的细化效果有所降低。

(3) 制备中施加超声处理联合凝固过程中施加超声处理, 不仅使得最终凝固组织中的小团块状  $TiAl_3$  相均匀分布, 还可以使  $TiB_2$  粒子变得轮廓清晰, 粒子聚集团内的粒子间不再粘连, 而是以疏松的鱼卵状存在, 具有这种组织形貌的 Al<sub>5</sub>Ti<sub>3</sub>B 中间合金的细化效果得以大大提高。

致谢 本研究工作得到了东南大学材料系陈锋、吴申庆教授的大力支持, 作者在此谨向他们表示衷心的感谢!

#### 参考文献:

- [1] MONHANTY P S, GRUZLESKI J E. Mechanism of grain refinement in aluminum [J]. *Acta Metallurgica*, 1995, 43 (5): 2001–2012.
- [2] MONHANTY P S, GRUZLESKI J E. Grain refinement mechanisms of hypoeutectic Al-Si alloys [J]. *Acta Metallurgica*, 1996, 44 (9): 3749–3760.
- [3] MURTY B S, KORIS A, CHAKRABORTY M. Grain refinement of aluminum and its alloys by heterogeneous nucleation and alloying [J]. *International Materials Reviews*, 2002, 47 (1): 3–29.
- [4] SPIHARAN T, LIH. Influence of Titanium to Boron ratio on the ability to grain refine aluminum-silicon alloys [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, 63: 585–589.
- [5] QUESTED T E, GREER A L, COOPER P S. The variable potency of  $TiB_2$  nucleant particles in the grain refinement of aluminum by Al-Ti-B additions [J]. *Materials Science Forum*, 2002, 396–402: 53–58.
- [6] LU X F, BIAN X F, QIX G, *et al*. Structure heredity between Al<sub>5</sub>Ti<sub>3</sub>B and Al-Ti-Al master alloys [J]. *Transactions Nonferrous Metals Society of China*, 1999, 9 (4): 806–809.
- [7] 刘相法, 边秀房, 李辉, 等. Al-Ti-B 中间合金细化效果的组织遗传效应 [J]. *金属学报*, 1996, 32 (2): 149–153.
- [8] SEWORTH G K. Communication on mechanism of grain refinement in aluminum [J]. *Scripta Metallurgica*, 1996, 34 (6): 919–922.
- [9] ABRAMOV O V. *Ultrasound in liquid and solid metals* [M]. CRC Press, 1994.
- [10] CAMPBELL J. Effect of vibration during solidification [J]. *International Materials Reviews*, 1981, 2: 71–104.
- [11] ABRAMOV O V, SOMMER F, ORLOY D, *et al*. Properties of Al-Pb base alloys applying electromagnetic forces and ultrasonic vibration during casting [J]. *Materials Letters*, 1995, 23: 17–20.
- [12] ABRAMOV O V, STRAUMAL B B, GUST W. Hypereutectic Al-Si based alloys with a thixotropic microstructure produced by ultrasonic treatment [J]. *Materials & Design*, 1997, 18 (4/6): 323–326.
- [13] ESKIN G J, PMENOV Y P, MAKAROV G S. Effect of cavitation melt treatment on the structure refinement and property improvement in cast and deformed hypereutectic Al-Si alloys [J]. *Materials Science Forum*, 1997, 242: 65–70.
- [14] 马立群, 陈锋, 舒光翼. 超声在制备 SiC/AlMg 颗粒增强复合材料中的应用 [J]. *东南大学学报*, 1995, 25 (2): 50–54.
- [15] PUSKAR A. *The use of high-intensity ultrasonic* [M]. Elsevier Amsterdam, 1982.

[1] MONHANTY P S, GRUZLESKI J E. Mechanism of grain refinement in aluminum [J]. *Acta Metallurgica*, 1995, 43

## Effect of High Intensity Ultrasonic on the Microstructure and Grain Refinement of Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B Master Alloy

HAN Yan-feng LI Ke WANG Jun, SUN Bao-de

(State Key Laboratory of Metal Matrix Composites, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract** The influence of high-intensity ultrasonic, which is applied in fabrication and remelting of Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B master alloy, on microstructure and grain refinement of the master alloy is investigated. When the commercial Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B master alloy is treated with high-intensity ultrasonic in the remelting process, its microstructure and grain refinement property are improved. The ultrasonic vibration in fabrication can accelerate the reaction of halide salts and aluminum melt, uniform the microstructure and increase the grain refining performance. The united ultrasonic treatments in fabrication and subsequent solidification of the master alloy can change not only the morphology of TiAl<sub>3</sub> phase, but also the morphology of TiB<sub>2</sub> particles agglomeration. As a result, the particles in the agglomeration do not conglomerate and are spawn-like form instead, and the performance of the master alloy is further improved.

**Key words** Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B master alloy; high-intensity ultrasonic; grain refinement