

中间合金中第二相粒子 TiC 和 TiAl₃ 对纯铝的细化作用

丁万武^{1,2}, 夏天东^{1,2}, 赵文军^{1,2}, 侯运丰^{1,2}

- (1. 兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室, 兰州 730050;
2. 兰州理工大学 有色金属合金及加工教育部重点实验室, 兰州 730050)

摘要: 研究 Al-TiC 和 Al-TiAl₃ 中间合金中第二相粒子 TiC 和 TiAl₃ 对纯铝晶粒的细化作用。结果表明: 当 TiC 和 TiAl₃ 单独作为 $\alpha(\text{Al})$ 的形核相时, 两者的形核能力均较差, 但 TiC 粒子的形核和抗细化衰退能力优于 TiAl₃ 粒子的; 当第二相粒子 TiC 和 TiAl₃ 共同作为 $\alpha(\text{Al})$ 的形核相, 且加入量适当时, 表现出较强的形核能力和抗晶粒细化的衰退能力, 细化效果较显著; 配成的 7 组晶粒细化剂中, 当细化剂中 Ti 和 C 摩尔比为 1.8:1 时, 晶粒细化效果最好; 这是由于 TiAl₃ 在铝熔体中分解释放出 Ti 原子并向 TiC 粒子周围偏聚, 形成的 TiC/铝熔体界面富 Ti 过渡区促进了 TiC 粒子在铝熔体中的均匀分布, 提高了其形核能力。

关键词: Al-TiC 中间合金; Al-TiAl₃ 中间合金; TiC; TiAl₃; 晶粒细化

中图分类号: TG 146.4 **文献标识码:** A

Refining performances of TiC and TiAl₃ phases in master alloys on pure aluminum

DING Wan-wu^{1,2}, XIA Tian-dong^{1,2}, ZHAO Wen-jun^{1,2}, HOU Yun-feng^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
2. Key Laboratory of Non-ferrous Metal Alloys and Processing, Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The second phase particles TiC and TiAl₃ on the refining performances of pure aluminum particles were studied in Al-TiC and Al-TiAl₃ master alloys. The results show that, when TiC and TiAl₃ phases are used as the $\alpha(\text{Al})$ nucleation phase, both of the two nucleation capabilities are poor, but TiC particle exhibits better nucleation and higher resistance to grain refining fading than TiAl₃ phase. When the second phase particles TiC and TiAl₃ are used as the $\alpha(\text{Al})$ nucleation phase and have a relatively quantity, they demonstrate better nucleation and higher resistance to grain refining fading. The experiments show that, in the seven groups grain refiners, the refining performances of the refiner with mole ratio of Ti to C of 1.8:1 is the best. The reason is that the TiC/aluminum interface, Ti-rich transition zone, formed by TiAl₃ releasing Ti atoms in aluminum melt, Ti atoms congregating to the TiC surface, promotes the distribution of TiC in aluminum melt and advances the nucleation of TiC.

Key words: Al-TiC master alloy; Al-TiAl₃ master alloy; TiC; TiAl₃; grain refinement

近年来, Al-Ti-C 的研究得到人们的逐渐重视。高泽生^[1]的研究表明, 在某些情况下, Al-Ti-C 比 Al-Ti-B 具有更好的细化效果, Al-Ti-C 细化剂中所含 TiC 粒子

的尺寸小于 TiB₂ 粒子的尺寸, 且不易发生聚集沉淀, 对 Zr 和 Cr 等元素免疫功能^[2-3], 而 C 来源广泛且可实现环境友好的工业生产。Al-Ti-C 中间合金被认为是

一种具有良好应用前景并被重点研究的晶粒细化剂^[4-9]。随着人们对晶粒细化现象认识的不断深入,针对晶粒细化机理提出了不少观点和理论^[10-11],但迄今为止仍没有统一的看法。就目前的研究现状,较有代表性的是包晶反应理论、硼化物-碳化物理论。Al及Al合金的晶粒细化机理是极其复杂的,要全面解析Al-Ti-C对 $\alpha(\text{Al})$ 的细化过程和细化机理还非常困难。国内外主要针对Al-Ti-C系中间合金的制备工艺、显微组织与细化效果、细化机理间的关系进行研究^[12-14],而关于第二相粒子TiC和TiAl₃对纯铝的细化作用及细化过程中两种粒子相互配合关系的研究报道不多。为此,本文作者将Al-TiC(只含TiC粒子)和Al-TiAl₃(只含TiAl₃粒子)两种中间合金配成不同含量的各种混合晶粒细化剂来细化工业纯铝,研究了Ti/C对细化效果的影响,明确了第二相粒子TiC和TiAl₃对纯铝的细化作用及两者的相互配合关系,以期对Al-Ti-C中间合金的制备和细化机理研究提供有益帮助。

1 实验

实验所用的主要材料为:Al粉(99.6%)、Ti粉(99.3%)、C粉(99.8%)和工业纯铝。实验设备为井式电阻炉,Al₂O₃坩锅以及辅助设备。先将原料粉末分别按一定比例配比后,在球磨机上混料1.5h。然后,将混合粉末在钢模中冷压成预制块(尺寸 $d\ 24\ \text{mm}\times 6\ \text{mm}$)。按铸锭成形后Ti的质量分数为3%称得相应的工业纯铝,并将铝块在井式电阻炉中熔化,待纯铝完全熔化后,将压好的预制块以涂有ZnO的铁棒压入铝液中,静置一段时间,待预制块完全反应后,搅拌直至完全熔化,然后注入顶部和底部直径分别为60mm和20mm、高为60mm的锥形钢模中,待完全冷却后制备出Al-TiC和Al-TiAl₃两种中间合金。

表1 各种细化剂的组成

Table 1 Compositions of different grain refiners

Sample	Grain refiner	w(Ti)/%	w(Al-TiC)/%	w(Al-TiAl ₃)/%	w(Ti) ¹⁾ _{ex} /%	n(Ti)/n(C)
A	Al-TiC	3	100.00	0	0	1:1
B	Al-TiC+Al-TiAl ₃	3	66.67	33.33	2	1.5:1
C	Al-TiC+Al-TiAl ₃	3	55.56	44.44	3	1.8:1
D	Al-TiC+Al-TiAl ₃	3	50.00	50.00	4	2:1
E	Al-TiC+Al-TiAl ₃	3	40.00	60.00	6	2.5:1
F	Al-TiC+Al-TiAl ₃	3	20.00	80.00	15	5:1
G	Al-TiAl ₃	3	0	100.00	-	-

1) w(Ti)_{ex} is relative content provided by TiAl₃.

预先准备好质量相同待细化的工业纯铝若干份,然后按细化时晶粒细化剂的总添加量,分别称取一定量的这两种中间合金,混合在一起配成各种复合晶粒细化剂,其组成如表1所列,对工业纯铝进行细化处理,以便研究各组细化剂之间细化效果的差异。

细化实验均在同一条件下进行:在坩锅内熔化预先准备好的工业纯铝,待铝液温度为720℃时,先把A和G细化剂分别按不同数量(按细化后试样Ti含量为0.02%~0.09%(质量分数))加入铝液充分搅拌,保温5min后,浇铸到锥形模中,从试样中部锯开,制成金相试样。再按同样的方法将5种细化剂B~F按细化后试样Ti含量为0.02%作细化实验。

为考察晶粒细化剂的抗晶粒细化衰退能力,将细化剂A、C和G按细化后试样Ti分别为0.03%、0.02%和0.07%加入铝液充分搅拌后,保持5、10、30、60、90和120min后分别取样。

采用大型光学显微镜(MEF3)、Hitachi S-520型扫描电子显微镜(SEM)、RigakuD/max-A型X射线衍射仪对中间合金的第二相进行分析。按GB3246.1~3246.2—2000^[15]截距法进行晶粒度评定。

2 结果及分析

2.1 Al-TiC和Al-TiAl₃两种中间合金的第二相

图1所示为Al-TiC中间合金的XRD谱。由图1可看出,该合金中只含有第二相TiC相微观组织。图2所示为Al-TiAl₃中间合金的XRD谱和微观组织。由图2可看出,大量的TiC粒子在 $\alpha(\text{Al})$ 晶界处呈团聚分布,该中间合金中只含有第二相TiAl₃相,TiAl₃相呈块状且分布均匀,数量很多。两种中间合金中都没有其它杂质相。如果将这两种分别含有TiC和TiAl₃的Al-TiC和Al-TiAl₃中间合金加入到纯铝熔液中,

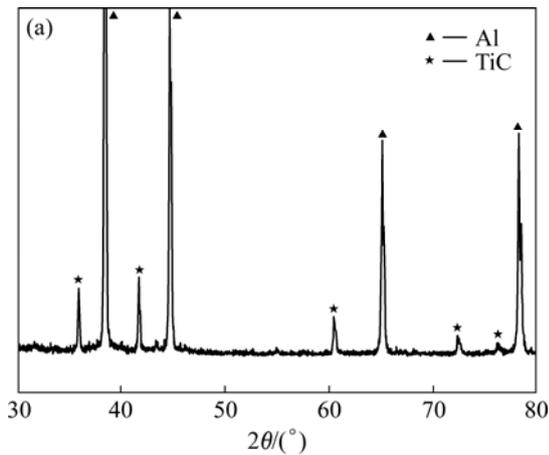


图 1 Al-TiC 中间合金的 XRD 谱(a)和微观组织(b)

Fig.1 XRD pattern (a) and microstructure (b) of Al-TiC master alloy

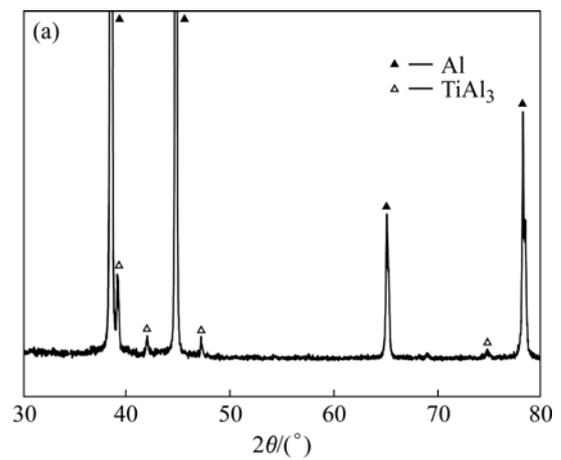


图 2 Al-TiAl₃ 中间合金的 XRD 谱(a)和微观组织(b)

Fig.2 XRD pattern (a) and microstructure (b) of Al-TiAl₃ master alloy

其中的 Al 基体会被铝液快速熔化, 而 TiC 和 TiAl₃ 粒子则会分布于铝液中。这样, 在铝液随后的凝固过程中, TiC 和 TiAl₃ 粒子有可能作为初生 α(Al) 相的异质晶核而细化铝晶粒。因此, 本文作者将 Al-TiC (只含 TiC 粒子) 和 Al-TiAl₃ (只含 TiAl₃ 粒子) 两种中间合金配成不同含量的各种混合晶粒细化剂来细化工业纯铝, 由于两种中间合金只是机械混合, 并没有发生重熔, 因此, 原有的中间合金的微观结构和相并未发生改变, 且各种混合晶粒细化剂中 TiC 粒子和 TiAl₃ 粒子的形态和分布是相同的, 因此, 实验主要用来考察 TiC 和 TiAl₃ 的相对含量对细化效果的影响及两者在细化过程中的作用。

2.2 晶粒细化剂对工业纯铝的晶粒细化效果

图 3 所示为 Al-TiC 和 Al-TiAl₃ 两种晶粒细化剂的加入量对试样平均晶粒尺寸的影响。由图 3 可见, 随着细化剂加入量的增加, 试样的晶粒尺寸呈快速下降趋势, 当 Ti 含量为 0.02% 时, Al-TiC 细化试样晶粒尺寸为 320 μm, 而 Al-TiAl₃ 细化试样晶粒尺寸高达 550 μm;

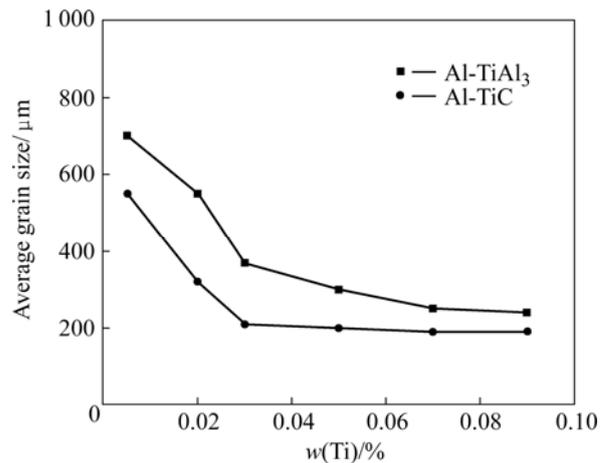


图 3 细化剂加入量对纯铝试样晶粒尺寸的影响

Fig.3 Effects of additions of grain refiners on average grain size of solidified sample

当 Ti 含量为 0.03% 时, Al-TiC 细化试样晶粒尺寸为 210 μm; 随后, 如再进一步增加 Al-TiC 晶粒细化剂的加入量, 则试样的晶粒尺寸没有明显变化。这说明在本实验条件下, 当 Ti 含量为 0.03% 时, Al-TiC 晶粒

细化剂就使得工业纯铝的细化效果达到饱和状态。同样,当Ti含量达到0.07%以后,Al-TiAl₃晶粒细化剂的细化效果也达到饱和状态,试样晶粒尺寸约为250 μm。由此可看出,Al-TiC和Al-TiAl₃两种晶粒细化剂对工业纯铝均有一定的细化效果,但前者的细化效果优于后者。

CIBULA^[16]提出的“碳化物粒子理论”认为TiC具有与α(Al)相同的面心立方晶体结构和非常接近的晶体常数,从结晶学角度出发,有利于α(Al)相的成核,可作为异质形核核心。ARNBERG和BACKERUD^[17]研究发现,在TiAl₃粒子与α(Al)之间共有(100)TiAl₃//(100)Al等11对错配度不超过5%的共格晶面。MOHANTY和GRUZLESKI^[18]以及CARTNEY^[19]在α(Al)晶粒中心发现TiAl₃粒子。而诸多研究表明^[20],TiAl₃的溶解时间与铝熔体的原始Ti含量、TiAl₃粒子的形态、尺寸以及熔体温度有关。本实验中,由于TiAl₃粒子的形态、尺寸以及熔体温度都是相同的,因此,影响TiAl₃溶解的主要因素是铝熔体中的原始Ti含量。铝熔体中原始Ti含量越低,TiAl₃越不稳定。在Ti含量(w(Ti)<0.05%)较低的情况下,TiAl₃粒子不稳定,它

在熔体中会分解成Ti原子和Al原子。在Ti含量(w(Ti)>0.05%)较高时,TiAl₃粒子会较长时间稳定存在于熔体中。本实验中,在Al-TiAl₃晶粒细化剂的加入量未达到w(Ti)=0.05%以前,加入的TiAl₃粒子大部分会溶解到熔体中,不能成为异质形核核心,因此细化效果较差;而当w(Ti)达到0.05%以后,随着细化剂加入量的增加,由于加入的TiAl₃粒子能够长时间稳定存在于熔体中在α-Al结晶时成为异质形核核心,则试样的晶粒得到明显的细化;直到细化剂加入量达到w(Ti)=0.07%以后,熔体中存在有足够量的TiAl₃粒子,细化效果达到饱和状态。可以说Al-TiC和Al-TiAl₃两种晶粒细化剂对工业纯铝的细化效果证明在α(Al)凝固过程中,TiC和TiAl₃可单独作为α(Al)的形核相,且只要保持铝熔体中足够数量的Ti含量,两种细化粒子均能达到较好的细化效果,但TiC粒子的形核能力优于TiAl₃粒子的。

图4和5所示分别为不同细化剂在相同添加量时(w(Ti)=0.02%)细化工业纯铝试样的宏观组织和晶粒平均尺寸。其中,细化剂A和G细化试样中分别只加入了TiC和TiAl₃,而细化剂B~F细化试样中均加入了TiC和TiAl₃,但TiC和TiAl₃摩尔数不同。由图4和

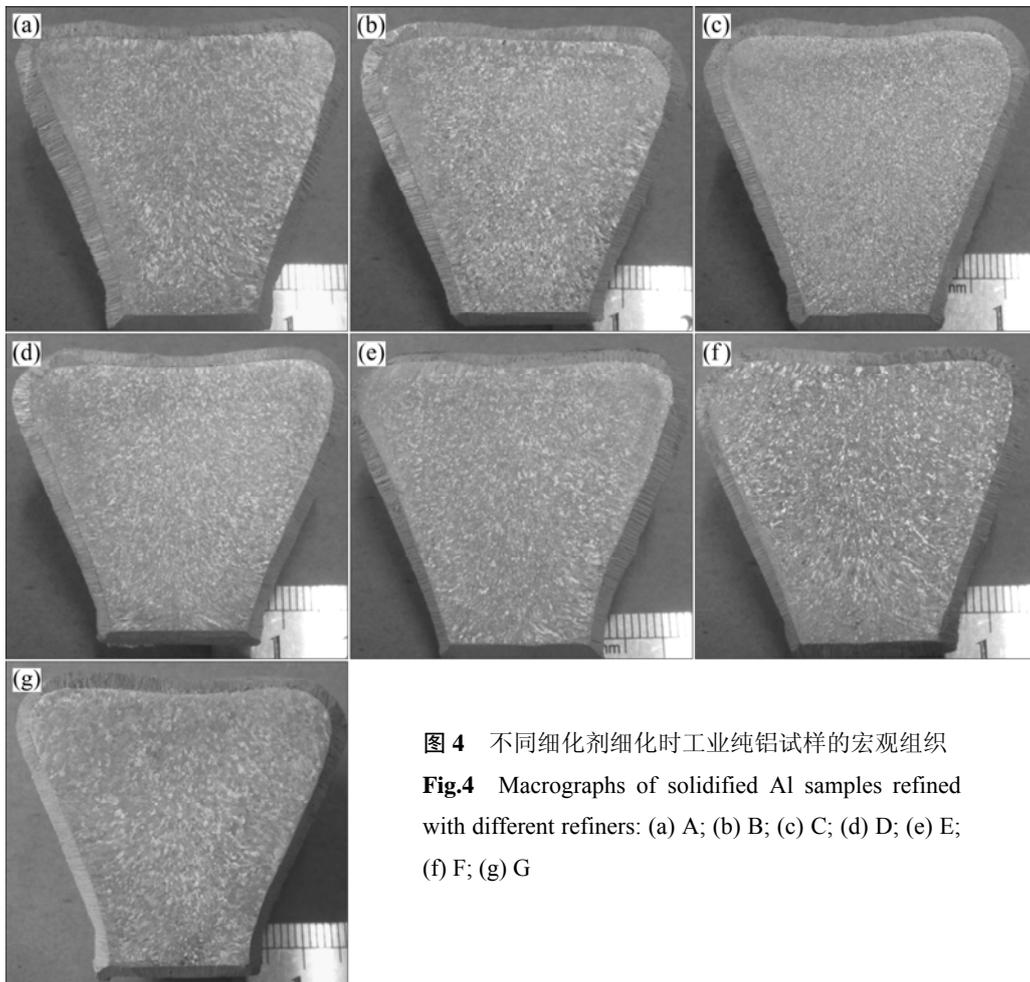


图4 不同细化剂细化时工业纯铝试样的宏观组织
Fig.4 Macrographs of solidified Al samples refined with different refiners: (a) A; (b) B; (c) C; (d) D; (e) E; (f) F; (g) G

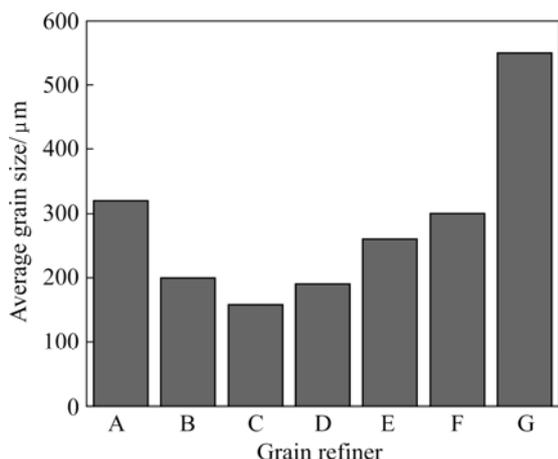


图 5 不同细化剂细化工业纯铝试样晶粒平均尺寸

Fig.5 Average grain size of solidified Al samples refined with different grain refiners

5 可以看出, 细化剂 B~F 细化试样的平均截距均小于细化剂 A 和 G 细化试样的。细化剂 B~F 的细化试样中, 细化剂 C 的细化试样平均截距最小, 为 158 μm, 这说明细化剂 C 的细化效果最好。细化剂 C 中同时存在 TiC 和 TiAl₃, 且其 $n(\text{Ti})/n(\text{C})=1.8:1$ 。同时结合表 1 可以看出, 当加入的晶粒细化剂的 $n(\text{Ti})/n(\text{C}) > 1.8$ 时, 随着 $n(\text{Ti})/n(\text{C})$ 的增大, 细化剂中所含 TiC 粒子相对含量越来越少, 而 TiAl₃ 粒子相对含量越来越多, 细化剂细化效果变的越来越差; 当晶粒细化剂的 $n(\text{Ti})/n(\text{C}) < 1.8$ 时, 随着 $n(\text{Ti})/n(\text{C})$ 比值的减小, 细化剂中所含 TiC 粒子的相对数目越来越多, 而 TiAl₃ 粒子相对含量越来越少, 细化效果也变的越来越不好。这说明晶粒细化剂中同时存在 TiC 和 TiAl₃ 粒子且保持适当的相对含量是取得良好晶粒细化效果的一个重要条件。Al-Ti-C 晶粒细化剂良好的细化效果离不开 TiAl₃ 和 TiC 的共同作用。当晶粒细化剂中 $n(\text{Ti})/n(\text{C})=1.8:1$ 时, 其细化效果最好。

单独含有 TiC 的晶粒细化剂时, 由于 TiC 粒子与铝熔体之间的湿润性差, TiC 粒子和液态铝界面上存在很高的界面能, TiC 粒子受液态铝排挤而发生聚集, 大量的 TiC 粒子在 $\alpha(\text{Al})$ 晶界处聚集成较大的粒子团, 因此, 细化时只有少量的 TiC 粒子成为了异质形核核心, 细化效果较差。而当细化剂中同时存在 TiC 和 TiAl₃ 粒子时, 在细化工业纯铝过程中, 在形核初期, $\alpha(\text{Al})$ 原子可以以 TiC 和 TiAl₃ 粒子为核心结晶长大, 随着时间的延长, 铝液中大部分 TiAl₃ 会溶解到铝熔体中并释放出 Ti 原子, 由于 Ti 在 TiC 和铝熔体中的活性差, 这些 Ti 原子偏聚在 TiC 粒子周围, 形成 TiC/铝熔体界面富 Ti 过渡区^[21]。富 Ti 过渡区改善了 TiC

粒子与铝熔体间的湿润性, 降低了 TiC 粒子的表面张力, 使得大量 TiC 粒子能够均匀地分布于铝熔体中, 这些 TiC 粒子尺寸细小, 且通过原位合成的, 具有很高的热力学稳定性^[22], 在铝熔体凝固时发生成核现象。因此, 同时含有第二相粒子 TiAl₃ 和 TiC 的晶粒细化剂的细化效果优于单独含有 TiC 或 TiAl₃ 细化剂的。

2.3 晶粒细化剂的抗晶粒细化衰退能力

当晶粒细化剂 A、C 和 G 的加入量按细化后铝熔体中 $w(\text{Ti})$ 分别为 0.03%、0.02% 和 0.07% 时, 铝液在 993 K 的保温时间与凝固试样晶粒尺寸的关系曲线如图 6 所示。由图 6 可见, 当细化剂 A 加入到铝液中后, 随着保温时间的延长, 试样的晶粒尺寸逐渐增加。铝液保温 120 min 后, 其平均晶粒尺寸由原来的 210 μm 增至 630 μm。而相对来说, 晶粒细化剂 C 的抗晶粒细化衰退能力较强。在保温 90 min 时, 晶粒细化剂 C 对工业纯铝的细化效果基本保持不变。继续增加保温时间到 120 min 时, 试样的晶粒度略微增加。而晶粒细化剂 G 在铝液保温 10 min 时就出现了细化效果明显衰退的现象。

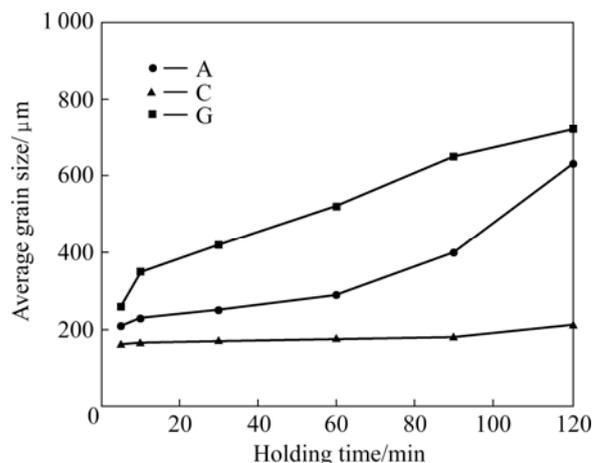


图 6 铝液的保温时间对试样晶粒尺寸的影响

Fig.6 Effects of holding time of liquid aluminum on average grain size of solidified samples refined with different grain refiners

进一步研究加入细化剂的铝熔体试样保温不同时间后在坩埚内快速冷却所获得试样底部的微观组织如图 7 所示。由图 7 可看出, 加入晶粒细化剂 A 的细化试样保温 90 min 后, 试样底部有大量黑色沉淀物(见图 7(a)); 而晶粒细化剂 C 的细化试样保温 90 min 后, 试样底部只有少量沉淀物(见图 7(b)); 晶粒细化剂 G 的细化试样保温 90 min 后, 试样底部没有沉淀物(见

图 7(c))。而由表 1 已知,晶粒细化剂 A 和 G 细化试样中分别只含有 TiC 和 TiAl_3 , 而晶粒细化剂 C 细化试样中同时存在 TiC 和 TiAl_3 , 且其 $n(\text{Ti})/n(\text{C})=1.8:1$ 。

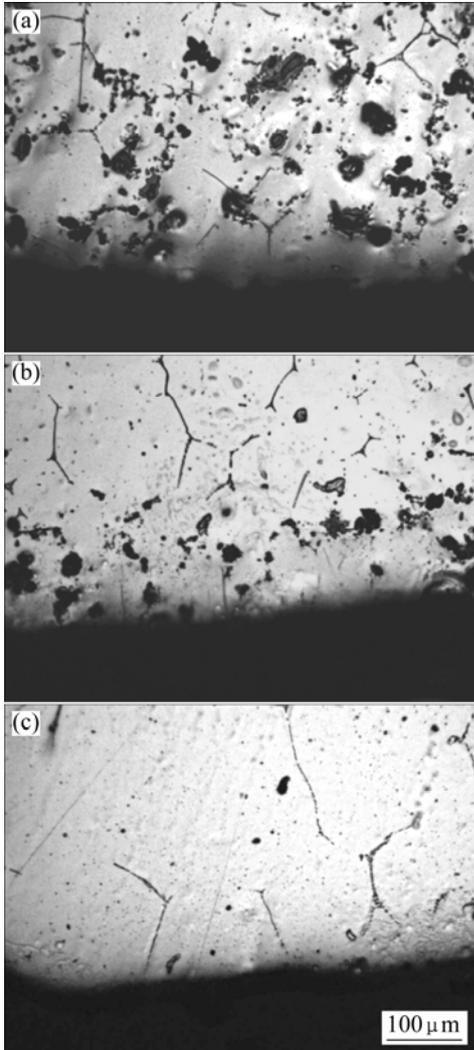


图 7 不同保温时间纯铝试样底部沉淀物的微观组织

Fig.7 Microstructures of deposition of solidified Al samples refined with different grain refiners and held for different times at bottom: (a) Grain refiner A, 90 min; (b) Grain refiner C, 90 min; (c) Grain refiner G, 90 min

铝熔体中单独存在 TiC 粒子时,由于 TiC 粒子与熔体铝之间存在密度差为 2.53 g/cm^3 (TiC 约为 4.93 g/cm^3 , 液体铝约为 2.4 g/cm^3), 在重力作用下, TiC 粒子会下沉。又由于 TiC 粒子与铝熔体之间的湿润性差, TiC 粒子和液态铝界面上存在很高的界面能, TiC 粒子受液态铝排挤而发生聚集, TiC 粒子聚集成较大的粒子团, 这将进一步加速 TiC 的沉淀。已知 TiC 在正常的细化温度下在铝熔体中能够稳定存在^[22], 而 TiAl_3 会发生溶解^[20], 因此, 本实验中观察到的这些黑色沉

淀物就是所加的 TiC (见图 7(a))。当把晶粒细化剂 C 加入到工业纯铝熔体中时, 在形核初期, $\alpha(\text{Al})$ 相以 TiC 和 TiAl_3 粒子为核心结晶长大, 随着保温时间的延长, 铝液中大部分 TiAl_3 会溶解到铝熔体中并释放出 Ti 原子, 由于 Ti 在 TiC 和铝熔体中的活性差^[21], 这些 Ti 原子偏聚在 TiC 粒子周围, 形成 TiC/铝熔体界面富 Ti 过渡区^[21], 富 Ti 过渡区的形成, 使粒子团的密度下降 (TiC 密度为 4.93 g/cm^3 , Ti 密度为 4.51 g/cm^3), 则粒子团与熔体铝之间的密度差减小, 使沉降速度变缓, 沉降时间延长。另外 Ti 元素改善了 TiC 粒子与铝熔体之间的湿润性, 降低了 TiC 粒子的表面张力, 使得大量的 TiC 粒子能够均匀分布于铝熔体中, 这些 TiC 粒子尺寸细小, 这使得粒子沉降阻力增大 (即相似于增大粘度), 延长了沉降时间, 而且它们是通过原位合成的, 具有很高的热力学稳定性^[22], 在铝熔体凝固时发生成核现象。因此, 当把同时含有第二相粒子 TiAl_3 和 TiC 的晶粒细化剂 C 加入到铝液中后, 尽管铝液保温了 90 min, 但其晶粒细化效果没有大的变化, 试样底部也只有少量的 TiC 粒子发生了沉淀 (见图 7(b))。而晶粒细化剂 G 加入到铝熔体中后, 大量 TiAl_3 在较短时间就溶解到铝液中, 不能成为 $\alpha(\text{Al})$ 的异质形核核心, 时间愈长, 铝熔体中剩余的 TiAl_3 粒子愈少, $\alpha(\text{Al})$ 结晶时异质形核核心愈少, 最终造成其细化效果明显衰退。同时, 从图 7(c) 可以看出, 细化剂 G 细化试样中加入的 TiAl_3 粒子在未沉淀到试样底部之前已经发生了溶解, 这也证明了 TiAl_3 粒子细化衰退性是由其溶解引起而非发生了沉淀。由此可以说明, 晶粒细化中同时存在第二相粒子 TiC 和 TiAl_3 是其良好的抗晶粒细化衰退能力的一个重要条件, TiC 粒子是重要的形核剂, 而 TiAl_3 起辅助形核的作用。

3 结论

1) Al-TiC 和 Al- TiAl_3 中间合金中第二相粒子 TiC 和 TiAl_3 可单独作为 $\alpha(\text{Al})$ 的形核相, 且只要保持铝熔体中足够的 Ti 含量, 两种细化粒子均能对工业纯铝达到较好的细化效果, 但 TiC 粒子的形核、抗细化衰退能力优于 TiAl_3 粒子的。

2) 晶粒细化剂中同时存在第二相粒子 TiC 和 TiAl_3 且保持 $n(\text{Ti})/n(\text{C})=1.8:1$ 时, 晶粒细化效果和抗晶粒细化衰退能力最好。

3) Al-Ti-C 晶粒细化剂良好的细化效果离不开 TiC 和 TiAl_3 粒子的共同作用, TiAl_3 在铝熔体中分解释放出 Ti 原子并向 TiC 粒子周围偏聚, 形成 TiC/铝熔体界面富 Ti 过渡区促进 TiC 粒子在铝熔体中的均匀分

布, 提高其形核能力是 Al-Ti-C 晶粒细化剂的形核机制。

REFERENCES

- [1] 高泽生. Al-Ti-C 晶粒细化用中间合金的最新进展[J]. 轻合金加工技术, 1998, 26(10): 5-11.
GAO Ze-sheng. Recent development of Al-Ti-C grain refining master alloys[J]. Light Alloys Pressing Technology, 1998, 26(10): 5-11.
- [2] LI Jian-guo, HUANG Min, MA Mo, YE Wei, LIU Dong-yu, SONG Dong-ming, BAI Bing-zhe, FANG Hong-sheng. Performance comparison of AlTiC and AlTiB master alloys in grain refinement of commercial and high purity aluminum[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2006, 16(2): 242-253.
- [3] VAN P, WIGGEN S, BELGRAVER J. From Al-Ti-B to Al-Ti-C developments in aluminum grain refiners[J]. Aluminum, 1999, 75(11): 989-994.
- [4] 柳延辉, 刘相法, 李廷斌, 边秀房, 张均艳. Al-Ti-C 中间合金对 Mg-Al 合金的晶粒细化作用[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(3): 623-625.
LIU Yan-hui, LIU Xiang-fa, LI Ting-bin, BIAN Xiu-fang, ZHANG Jun-yan. Grain refining effect of Al-Ti-C master alloy on Mg-Al alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(3): 623-625.
- [5] WANG Zhen-qing, LIU Xiang-fa, LIU Yan-hui. Structural heredity of TiC and its influences on refinement behaviors of AlTiC master alloy[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2003, 13(4): 790-793.
- [6] ZHANG Zhong-hua, BIAN Xiu-fang, WANG Yan, LIU Xiang-fa, WANG Zhen-qing. TEM observations of rapidly solidified AlTiC alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2003, 34(9): 121-128.
- [7] LIU Xiang-fa, WANG Zhen-qing. The relationship between microstructures and refining performances of Al-Ti-C master alloys[J]. Mater Sci Eng A, 2002, A332: 70-74.
- [8] WANG Zhen-qing, LIU Xiang-fa, LIU Yan-hui, ZHANG Jun-yan, YU Li-na, BIAN Xiu-fang. Structural heredity of TiC and its influences on refinement behaviors of AlTiC master alloy [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2003, 13(4): 790-793.
- [9] 李英龙, 温景林, 陈彦博, 曹富荣, 占国灿. SHS 技术制备 Al-3Ti-0.15C 晶粒细化剂[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(2): 179-183.
LI Ying-long, WEN Jing-lin, CHEN Yan-bo, CAO Fu-rong, ZHAN Guo-chan. Al-3Ti-0.15C grain refiner prepared by SHS [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(2): 179-183.
- [10] 冯鹏发, 唐靖林, 李双寿, 曾大本. 铝晶粒细化机制的研究进展[J]. 铸造技术, 2005, 26(3): 220-223.
FENG Peng-fa, TANG Jing-lin, LI Shuang-shou, ZENG Da-ben. Development of mechanism of grain refinement in aluminum[J]. Foundry Technology, 2005, 26(3): 220-223.
- [11] 赵文军, 丁万武, 夏天东, 侯运丰. Al-Ti-C 中间合金制备方法 及细化机理研究现状[J]. 铸造技术, 2008, 29(11): 1559-1562.
ZHAO Wen-jun, DING Wan-wu, XIA Tian-dong, HOU Yun-feng. Research status and development trend of preparation of Al-Ti-C master alloy[J]. Foundry Technology, 2008, 29(11): 1559-1562.
- [12] WHITEHEAD A J, DANILAK S A. The development of a commercial Al-3%Ti-0.15%C grain refining master alloy[J]. Light Metals, 1997(2): 785-793.
- [13] IQBAL N, van DIJK N H, OFFERMAN S E, GEERLOFS N, MORET M P, KATGERMAN L, KEARLEY G J. In situ investigation of the crystallization kinetics and the mechanism of grain refinement in aluminum alloys[J]. Mater Sci Eng A, 2006, A416: 18-32.
- [14] ZHANG M X, KELLY P M, EASTON M A. Crystallographic study of grain refinement in aluminum alloys using the edge-to-edge matching model[J]. Acta Materialia, 2005, 53(11): 1427-1438.
- [15] GB3246.1~3246.2—2000. 变形铝及铝合金制品组织检验方法[S].
GB3246.1~3246.2—2000. Method of testing on aluminium and aluminium alloys[S].
- [16] CIBULA A. The mechanism of grain refinement of sand casting in aluminum alloys [J]. J Inst Metals, 1949/1950, 76: 321-360.
- [17] ARNBERG L, BCKERUD L. Grain refinement in castings and welds[C]// ABBASCHIAN G J. Fall Meeting of the Metallurgical Society of AIME. Louis, Missouri: The Metallurgical Society of AIME, 1983: 165-168.
- [18] MOHANTY P S, GRUZLESKI J E. Mechanism of grain refinement in aluminum[J]. Acta Metallurgicae Materialia, 1995, 43(5): 2001-2012.
- [19] CARTNEY G M. Grain refining of aluminum and its alloy using inoculants[J]. International Material Reviews, 1989, 34(5): 247-260.
- [20] 刘相法, 边秀房, 薛佩军, 李久平, 马家骥. TiAl₃ 在铝熔体中结构遗传的动力学研究[J]. 机械工程学报, 1999, 35(3): 67-71.
LIU Xiang-fa, BIAN Xiu-fang, XUE Pei-jun, LI Jiu-ping, MA Jia-ji. Structure hereditary dynamics of TiAl₃ in Al melt[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1999, 35(3): 67-71.
- [21] YU Li-na, LIU Xiang-fa. Ti transition zone on the interface between TiC and aluminum melt and its influence on melt viscosity[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 182(3): 519-524.
- [22] 严有为, 刘生发, 范晓明, 傅正义, 魏伯康. 自蔓延高温合成 Al-TiC 晶粒细化剂及其晶粒细化效果[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(5): 977-981.
YAN You-wei, LIU Sheng-fa, FAN Xiao-ming, FU Zheng-yi, WEI Bo-kang. SHS of Al-TiC grain refiners and their grain refining performances for commercially pure aluminum[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(5): 977-981.

(编辑 李艳红)