

文章编号: 1004 - 0609(2004)10 - 1729 - 07

加钛方式与钛含量对 A356 合金组织和性能的影响^①

宋谋胜, 刘忠侠, 李继文, 宋天福, 王明星, 谢敬佩, 翁永刚
(郑州大学 物理工程学院, 材料物理教育部重点实验室, 郑州 450052)

摘要: 研究了不同钛含量的电解 A356 合金的组织和力学性能, 并与相应钛含量的熔配加钛 A356 合金进行了比较。结果表明: 随着钛含量的增加, 二者的晶粒和一次枝晶都明显细化, 硅颗粒尺寸、纵横比均有所降低, 硅颗粒圆形度有所增加, 意味着硅颗粒形状得到改善。但当钛含量大于 0.1% 时, 这种影响变弱。钛含量和加钛方式对合金的屈服强度和抗拉强度影响不大且二者相当, 但塑性随着钛含量的增加而增加, 当钛含量达到 0.1% 时, 两种合金均具有最佳的塑性和质量系数。对具有相同钛含量的合金, 电解加钛 A356 合金的晶粒和 Si 颗粒的尺寸小于相应钛含量熔配加钛 A356 合金, 硅颗粒圆形度也优于相应熔配加钛 A356 合金, 电解 A356 合金的塑性、质量系数均优于相应钛含量的熔配加钛 A356 合金, 但加钛方式对硅颗粒纵横比影响不系统。

关键词: 加钛方式; 钛含量; A356 合金; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG 146.2

文献标识码: A

Effect of titanium alloying manner and titanium content on microstructure and mechanical properties of A356 alloys

SONG Mou-sheng, LIU Zhong-xia, LI Ji-wen, SONG Tian-fu,
WANG Ming-xing, XIE Ji-rui, WENG Yong-gang
(School of Physics Engineering, The Key Lab of Material Physics,
Ministry of Education, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: The microstructure and mechanical properties of electrolytic A356 alloys with different titanium contents were investigated and compared with those of A356 alloys alloyed by melting Al-Ti master alloys. The results show that the grain, primary dendrite and Si particles of both kinds of alloys are obviously refined with increasing titanium content. The aspect ratio decreases and the roundness of Si particles increases, which means that the shape of Si is improved. This effect on the microstructure decreases when titanium content exceeds 0.1%. The effects of titanium content and titanium alloying manner on the yield strength and tensile strength of alloys are trifling, but the ductility increases with increasing titanium content. Two kinds of alloys have the optimal elongation and quality index when titanium content approaches 0.1%. For the alloys with the same titanium content, the sizes of grain and Si particles of electrolytic A356 alloys are less than those of A356 alloys alloyed by melting Al-Ti master alloys. The roundness of Si particles, the elongation and quality index of the former are superior to those of the latter. The effect of titanium alloying manner on the aspect ratio is unsystematic.

Key words: titanium alloying manner; titanium content; A356 alloys; microstructure; mechanical properties

A356 合金(ZL101A) 因具有优良的铸造性能, 热处理性能、加工性能、疲劳性能以及良好的强度、塑性, 成为目前汽车、摩托车轮毂使用最为广

泛的 Al-Si 系列铸造合金^[1]。人们发现, 低钛合金化处理可以实现晶粒的细化, 是提高铝合金性能的有效手段之一。在 A356 合金中添加少量的元素钛,

① 基金项目: 河南省重大科技攻关项目(0322020600)

收稿日期: 2004-03-29; 修订日期: 2004-06-10

作者简介: 宋谋胜(1973-), 男, 硕士研究生。

通讯作者: 刘忠侠, 副教授, 博士; 电话: 0371-7767776; 传真: 0371-7767776; E-mail: liuzhongxia@zhu.edu.cn

就能有效地细化合金的晶粒,明显改善合金的综合力学性能。传统上,钛是通过向熔体中添加 Al-Ti 或 Al-Ti-B 中间合金来实现的^[2-4]。由于依赖于中间合金熔化时释放出的 TiAl₃ 质点和钛原子,这种方法存在铝耗大、细化效果不稳定、衰退快、质量难于控制等缺点,需要严格控制熔配温度。近年来我国对电解法生产铝合金开展了一系列研究,邱竹贤等^[5, 6]曾进行电解生产 Al-Ti、Al-Ti-B 等中间合金试验,表明电解法生产 Al-Ti 中间合金是可能的,但一直未投入工业化应用。杨冠群、王汝耀等^[7, 8]通过在电解质中添加一定量的硅钛氧化铝矿粉,直接电解生产出了含有一定量的钛、硅的 Al-Si-Ti 合金,但由于对电解槽参数影响大,合金成分难于控制,目前仍处于工业试验阶段。郑州大学材料物理实验室等经过数年的实验和探索,通过在电解槽中添加一定量的氧化钛,用电解法直接制备出具有一定含钛量的低钛铝合金。已有的工作表明,直接电解低钛铝合金不改变纯铝的电解工艺和生产效率,具有合金晶粒细化效果好、抗衰退能力强等优点^[9-11]。本文作者研究对比了不同钛含量的电解加钛与熔配加钛 A356 合金的微观组织和力学性能,并对二者的性能差异进行了分析。

1 实验

电解加钛 A356 合金选用含钛量(质量分数)分别为 0.04%、0.10%、0.18% 和 0.20% 的低钛铝合金细晶铝锭进行熔配。首先将其与结晶硅配制成硅含量为 10% 的低钛 Al-Si 中间合金,然后将配制的低钛 Al-Si 中间合金和低钛铝合金,按一定比例放入 7.5 kW 的电阻坩锅炉中加热熔化。740 °C 时加入

Al-8.6% Sr 中间合金进行变质处理,铈含量以 0.04% 计,750 °C 时通入氩气除气 10 min,720 °C 加镁,然后除渣,静置 10 min 后浇注。采用金属型模具,浇注前预热到 200 °C,浇注温度 710 °C。试样采用 T6 热处理,在 535 °C 固溶 6 h,在 60 °C 的热水中淬火,165 °C 人工时效 8 h。熔配加钛 A356 合金则先用纯铝与硅配制成含硅量为 10% 的 Al-Si 中间合金配制,晶粒细化剂为 Al-5% Ti 中间合金,浇注前 30 min 加入,其它原材料及工艺与电解 A356 合金相同。合金的化学成分采用 Metascan2500 型金属分析仪进行分析,分析结果如表 1 所列。金相样品均取自拉伸试样的夹头部位,宏观组织用 CuCl₂ 溶液腐蚀,微观组织则用 0.5% 的 HF 溶液腐蚀,用配备图像采集系统的 Nikon MBA21000 型金相显微镜来观察微观组织并拍照,每个样品在不同处拍 20 余幅照片。利用武汉大学开发的 WD-5 电镜联机及光镜图文管理系统来定量计算一次枝晶尺寸以及硅颗粒的尺寸。拉伸性能采用标准直径 $d_0=10\text{ mm}$, $l_0=8d_0$ 的标准圆柱拉伸试棒,在 MTS810 液压伺服材料试验机上进行,拉伸速率为 1 mm/min,每种成分合金使用 8 根样品。拉伸断口形貌则用 JSM-5600 型扫描电子显微镜进行观察。

2 结果与讨论

2.1 合金的显微组织分析

图 1 所示为电解 A356 合金的宏观组织。由图 1 可以看出,当钛含量较低时 ($E04, w(\text{Ti})=0.04\%$),合金晶粒细化效果不明显,这可能是硅对钛的毒化所致^[3]。而随着钛含量的增加,合金的晶粒得到了明显细化,但钛含量超过 0.10% 时,钛

表 1 合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of alloys (mass fraction, %)

Sample No.	Ti alloying method	Si	Fe	Mg	Ti	Sr	Al
00	Free Ti	6.54	0.126	0.374	0	0.027	Bal.
E04	Ti alloying by electrolysis	6.59	0.109	0.398	0.037	0.027	Bal.
M04	Ti alloying by melting Al-5% Ti master	6.71	0.109	0.408	0.046	0.022	Bal.
E10	Ti alloying by electrolysis	6.47	0.100	0.320	0.105	0.027	Bal.
M10	Ti alloying by melting Al-5% Ti master	6.73	0.105	0.355	0.093	0.028	Bal.
E14	Ti alloying by electrolysis	6.87	0.099	0.405	0.139	0.025	Bal.
M14	Ti alloying by melting Al-5% Ti master	6.89	0.107	0.406	0.131	0.025	Bal.
E18	Ti alloying by electrolysis	6.81	0.093	0.416	0.176	0.033	Bal.
M18	Ti alloying by melting Al-5% Ti master	6.84	0.107	0.419	0.175	0.031	Bal.

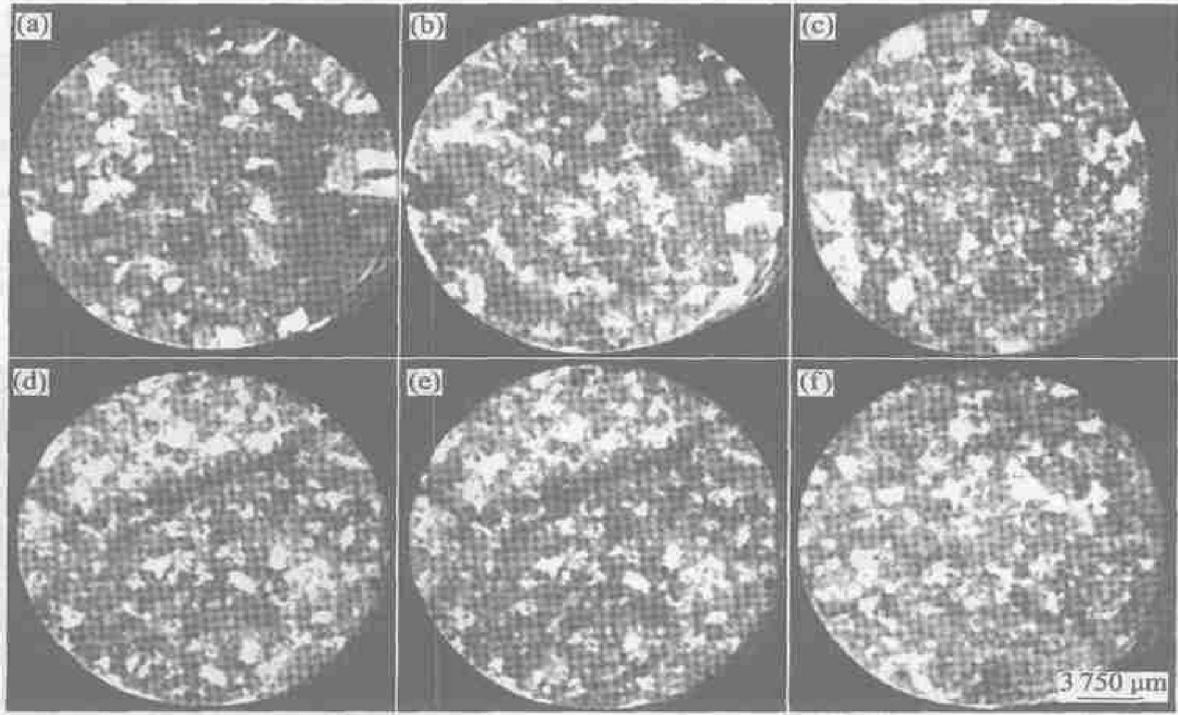


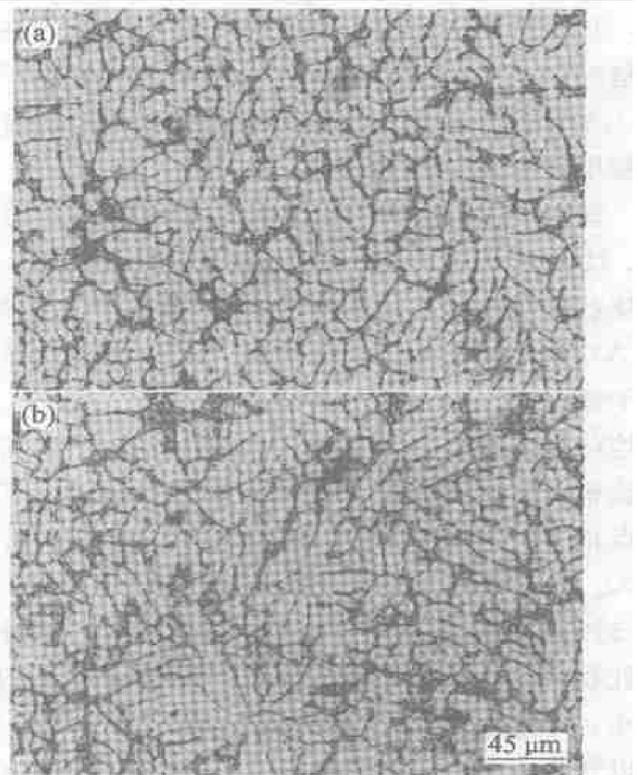
图 1 A356 合金的宏观组织

Fig. 1 Macrostructures of A356 alloys

- (a) —Free Ti; (b) —Ti alloying by electrolysis, $w(\text{Ti}) = 0.04\%$; (c) —Ti alloying by electrolysis, $w(\text{Ti}) = 0.10\%$;
 (d) —Ti alloying by electrolysis, $w(\text{Ti}) = 0.14\%$; (e) —Ti alloying by electrolysis, $w(\text{Ti}) = 0.18\%$;
 (f) —Al-5Ti master alloy alloying, $w(\text{Ti}) = 0.10\%$

对合金晶粒尺寸的细化效果下降。作为对比图中给出了含钛量为 0.10% 的熔配加钛 A356 合金(M10)的宏观组织,可以看出,电解加钛 A356 合金晶粒尺寸明显较熔配加钛合金细小。图 2 所示为与图 1 中两种加钛方式合金 E10, M10 相对应的典型微观组织,二者微观组织均由 $\alpha(\text{Al})$ 枝晶和铝硅共晶区组成,与图 1 结果类似,电解加钛 A356 合金的微观组织略细于熔配加钛合金。图 3 所示为两种合金的一次枝晶长度与钛含量的关系,可以看出,随着钛含量的增加,两种加钛方式合金的一次枝晶尺寸逐渐减小,但钛含量超过 0.10% 后,减小之势变缓。相对而言,在所实验合金钛含量范围内,电解加钛一次枝晶尺寸均较熔配加钛合金细小。由于一次 $\alpha(\text{Al})$ 枝晶尺寸直接与合金晶粒细化效果有关,很明显,电解加钛对合金晶粒的细化效果更显著。

钛对铝合金晶粒的细化作用来自于 TiAl_3 对 $\alpha(\text{Al})$ 晶粒的非均质形核作用和钛对晶粒生长的抑制作用^[1-4]。对 A356 合金而言,合金中较高含量的硅部分取代了 TiAl_3 中的钛形成 $\text{Ti}(\text{Al}_{1-x}\text{Si}_x)_3$ 三元化合物,改变了 TiAl_3 质点的晶格常数,降低了 TiAl_3 质点的异质形核效果,出现所谓的硅对钛晶粒细化的毒化作用,因此,当钛含量较低时,钛对

图 2 A356 合金($w(\text{Ti}) = 0.1\%$)微观组织**Fig. 2** Microstructures of A356 alloys

- (a) —Ti alloying by electrolysis;
 (b) —Al-5Ti master alloy alloying

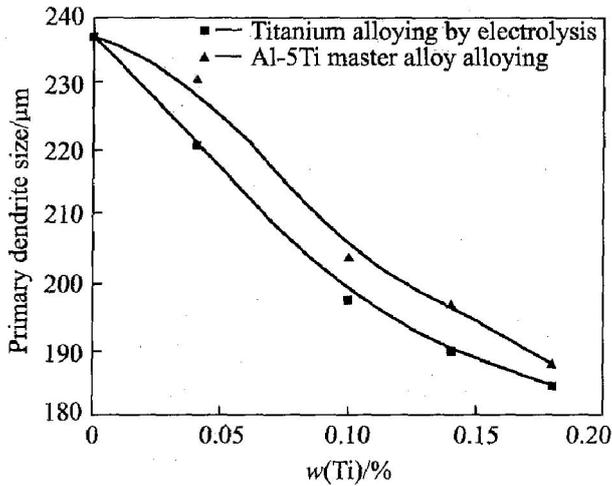


图3 钛含量对一次枝晶长度的影响

Fig. 3 Effect of titanium content on primary dendrite size

合金晶粒细化效果不显著。随钛含量的增加, $Ti(Al_{1-x}Si_x)_3$ 质点数量增加, 其非均质形核能力增强, 使得 $\alpha(Al)$ 相形核率增加。同时, 随着钛含量增加, 钛的成分过冷增强, 也会激发更多的 $\alpha(Al)$ 相形核, 钛对 $\alpha(Al)$ 相生长抑制作用和对合金晶粒细化效果也相应增加。但是, 钛含量超过 0.10% 时, 过高的钛含量有可能造成 $Ti(Al_{1-x}Si_x)_3$ 质点的聚集和沉淀, 从而降低钛对合金晶粒的细化效果, 王汝耀等也发现了类似的现象^[12], 他们在含钛量超过 0.10% 的 A356 合金中发现了针状 $Ti(Al_{1-x}Si_x)_3$ 的存在, 因此, 过高的钛含量不一定对合金的晶粒细化和力学性能有利。

钛对铝合金的细化效果受 $TiAl_3$ 的形态和尺寸、钛的分布的影响^[13]。细小、均匀的 $TiAl_3$ 质点较块状或板条状 $TiAl_3$ 细化效果更显著。和熔配加钛 A356 合金相比, 电解加钛 A356 合金中的钛来自于原材料电解过程, 材料中存在有大量的、从合金熔体中原位析出的内在 $TiAl_3$ 质点, 图 4 所示为低钛铝合金细晶铝锭和 Al-5%Ti 中间合金中 $TiAl_3$ 质点形貌, 可以看出, 低钛铝合金细晶铝锭中 $TiAl_3$ 质点非常细小(尺寸小于 5 μm)、均匀。而在 Al-5%Ti 中间合金中, $TiAl_3$ 质点粗大, 部分呈粗大针状。很明显, 低钛铝合金细晶铝锭存在的这些细小、均匀的 $TiAl_3$ 质点, 在合金熔体中均匀分布, 可以作为电解加钛 A356 合金中 $\alpha(Al)$ 相的有效形核核心。而熔配加钛 A356 合金, $\alpha(Al)$ 相的有效形核核心依赖于 Al-5%Ti 中间合金中粗大 $TiAl_3$ 相的熔断与扩散, $TiAl_3$ 质点的尺寸、在熔体中的分布及均匀性较电解加钛 A356 合金差。此外, 从组织遗传角度, 在重

熔过程中, 由于合金熔配温度远低于合金熔体结构的无序化温度, 原材料中存在的这些细小的 $TiAl_3$ 质点可以以 AlTi 原子团簇的方式存在于合金熔体中^[14], 因此合金熔体中存在较多的由这些原子团簇组成的微观不均匀区域, 在随后的凝固过程中, 这些微小的 AlTi 原子团簇可以作为 $\alpha(Al)$ 相的有效形核核心遗传给 A356 合金, 使得电解加钛 A356 合金具有细小的晶粒组织。

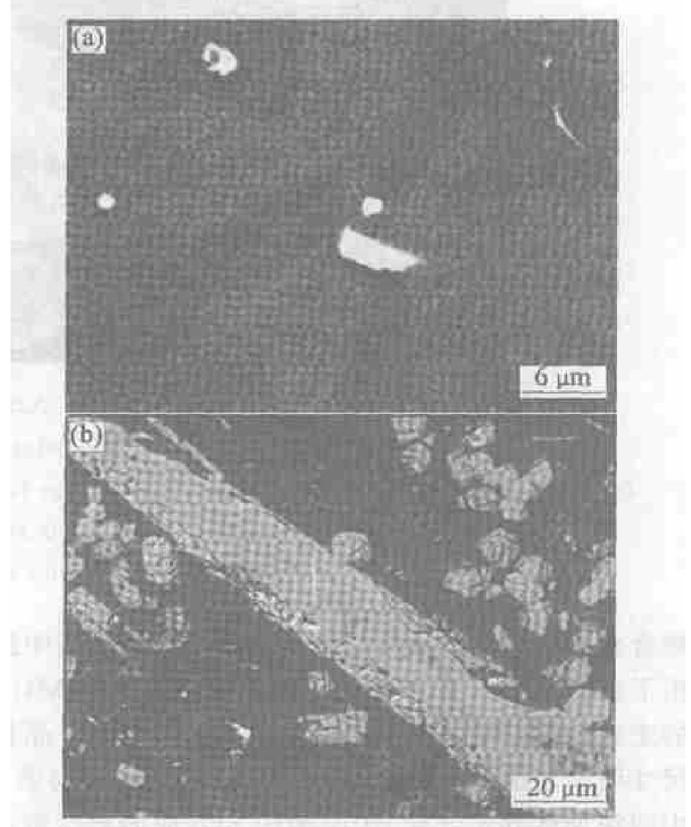


图4 合金中 $TiAl_3$ 质点形貌(SEM)

Fig. 4 Morphologies of $TiAl_3$ particles in alloys

- (a) —Low-titanium aluminium alloys billets, $w(Ti) = 0.2\%$;
- (b) —Al-5%Ti master alloys

值得注意的是, 加钛方式和钛含量对合金热处理后的共晶硅颗粒形状和尺寸也具有明显的影响。图 5 所示为钛含量对两种加钛方式合金硅颗粒尺寸和形状的影响。可以看出, 除含钛量较低的两种合金(E04 和 M04)外, 电解加钛 A356 合金的硅颗粒的尺寸小于相应钛含量熔配加钛 A356 合金, 圆形成度也优于相应熔配加钛 A356 合金, 但加钛方式对硅颗粒纵横比影响不系统。随钛含量的增加, 两种合金的硅颗粒尺寸和纵横比均逐渐减小, 而圆形成度逐渐增大。当钛含量小于 0.10% 时, 这种影响特别显著, 而当钛含量大于 0.10% 时, 影响明显变弱, 与钛对合金晶粒尺寸的影响非常类似。文献[15, 16]

也发现了类似的现象, 他们的研究表明, 随着 $\alpha(\text{Al})$ 晶粒尺寸增大, 共晶硅颗粒也有变大的趋势。

成钛对 $\alpha(\text{Al})$ 相生长的抑制作用没有大的增加, 对硅颗粒尺寸和形状的影响降低。

2.2 合金的力学性能分析

图 6 所示为两种加钛方式合金的力学性能与钛含量的关系。可以看出, 加钛方式和钛含量对合金强度影响较小, 两种合金具有相近的屈服强度和抗拉强度, 但对合金塑性影响较大。在整个试验钛含量范围内, 电解加钛 A356 合金的延伸率均优于熔配加钛 A356 合金。随着钛含量的增加, 二者的延伸率均呈现先增加后降低的趋势, 当钛含量达到 0.10% 时, 两种合金具有最佳的延伸率 R_e , 延伸率分别较不含钛 A356 合金提高 46% 和 29%。图 7 所示为两种加钛方式合金的质量系数 Q 与钛含量的关系, 可以看出, 随着钛含量的增加, 两种合金的质量系数均逐渐增加, 但钛含量超过 0.10% 后增加的趋势变缓, 电解加钛 A356 合金的质量系数优于熔配加钛合金。由于合金质量系数 $Q(Q/\text{MPa} = \sigma_b + 150\lg(R_e/\%))$ 将合金的强度与塑性有机的结合起来, 可以用来表征合金的综合力学性能, 很明显, 电解加钛的 A356 合金的综合力学性能优于相应钛含量的熔配加钛 A356 合金。图 8 所示为钛含量为 0.1% 的两种合金的典型拉伸断口形貌(以 E10、M10 为例)。可见两种合金的断口上基本由韧窝组成, 表明二者是以微孔聚集型(韧窝)为主的延性断裂。相对而言, 电解加钛 A356 合金的韧窝尺寸稍大于熔配加钛合金, 表明电解加钛 A356 合金在断裂前承受了较大的变形, 与前述电解加钛 A356 合金具有较高的塑性结果一致。

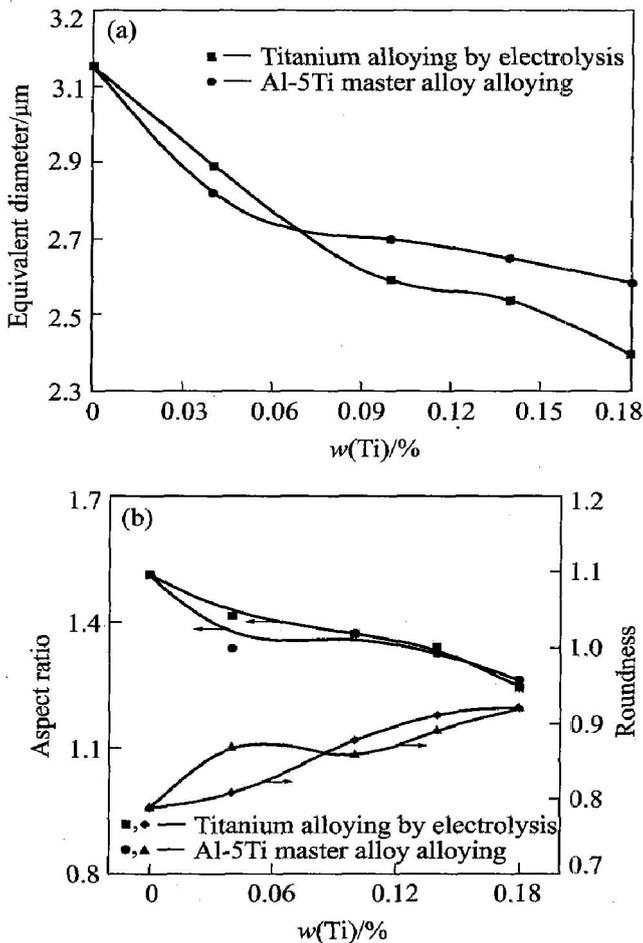


图 5 Ti 含量对 Si 颗粒尺寸和形状的影响

Fig. 5 Effect of titanium content on size and roundness of Si particles

(a) —Equivalent diameter;
(b) —Aspect ratio and roundness

Heiberg 和 Criado 的研究工作表明^[17, 18], 共晶区总是在初晶 $\alpha(\text{Al})$ 相枝晶间形成, 共晶 $\alpha(\text{Al})$ 相与初晶 $\alpha(\text{Al})$ 相具有相似的位向关系, 初晶 $\alpha(\text{Al})$ 提供了共晶硅的结晶核心。因此, 共晶硅总是以 $\alpha(\text{Al})$ 相为领先相与 $\alpha(\text{Al})$ 相协调生长。随着 $\alpha(\text{Al})$ 相的细化, 也会相应细化合金的硅颗粒尺寸, 改善硅颗粒形状。此外, 钛的加入不但可以抑制初晶 $\alpha(\text{Al})$ 的生长, 细化 $\alpha(\text{Al})$ 相, 从而影响共晶硅的生长, 也会对共晶 $\alpha(\text{Al})$ 相的生长产生抑制作用, 在与之协调生长的共晶硅颗粒上, 有可能造成较多的生长台阶等缺陷。固溶处理过程中硅颗粒在这些缺陷处碎化的几率增加, 从而有效地细化硅颗粒的尺寸, 改善硅颗粒的形状, 且钛含量越高越显著, 类似于钛对晶粒的细化作用。钛含量超过 0.1% 时, 过多的钛以 TiAl_3 颗粒的形式聚集和沉淀, 从而造

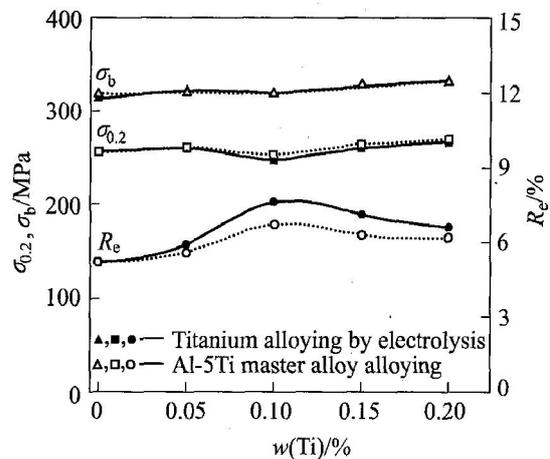


图 6 力学性能与 Ti 含量的关系

Fig. 6 Relationships of Ti content vs mechanical properties

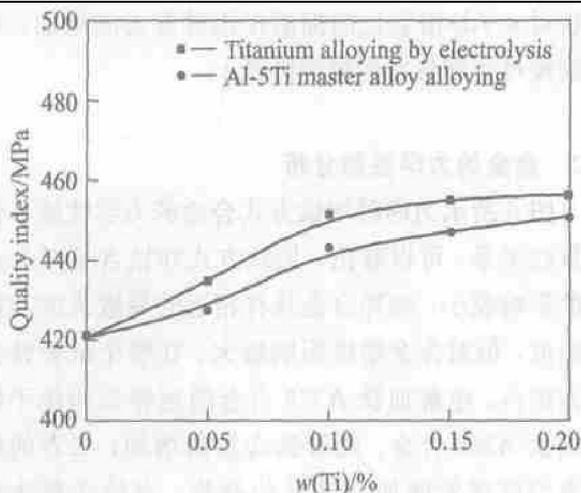


图 7 质量系数与 Ti 含量的关系

Fig. 7 Relationship of Ti content vs quality index

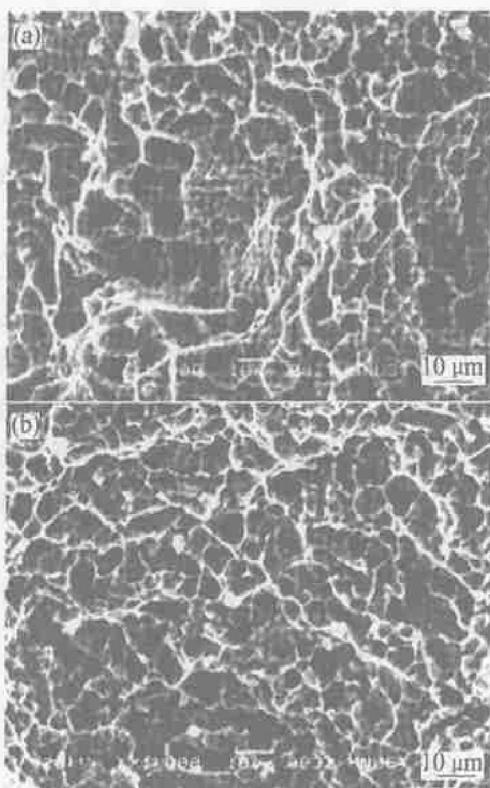


图 8 拉伸试样断口形貌

Fig. 8 Fracture surface of tensile samples ($w(\text{Ti})=0.10\%$)

(a)—Ti alloying by electrolysis (E10);

(b)—Al-5Ti master alloy alloying (M10)

A356 合金的力学性能主要取决于晶粒尺寸、硅颗粒和 Mg_2Si 的体积分数、形貌、尺寸及分布^[19, 20]。在拉伸应力作用下,微裂纹总是通过硅颗粒和夹杂物的开裂、与 $\alpha(\text{Al})$ 相基体的分离来萌生,通过 $\alpha(\text{Al})$ 相基体沿枝晶边界来扩展。合金的强度来自于硅颗粒的第二相强化和 Mg_2Si 粒子的弥散强

化。由于本实验仅改变合金的钛含量和加钛方式,两种合金具有相近的硅含量和采用相同的热处理工艺,因此,两种合金中硅颗粒和 Mg_2Si 粒子的体积分数差别不大,从而造成两种合金具有相近的屈服强度和抗拉强度。但是,电解加钛细化了合金的 $\alpha(\text{Al})$ 枝晶和硅颗粒,改善了硅颗粒形状。一方面,硅颗粒尺寸的减小和圆形度的增加减少了硅颗粒开裂的几率,增加了微裂纹萌生的阻力;另一方面, $\alpha(\text{Al})$ 相的细化导致位错运动的阻力增加,使得合金的 $\alpha(\text{Al})$ 基体加工硬化率增加,合金变形可以以更加协调的方式进行,从而有效地阻止了微裂纹的聚集和长大。因此在拉伸载荷下,合金可以承受更大的变形,使得合金的塑性得到明显提高。类似地,随着钛含量的增加,合金的微观组织和硅颗粒进一步细化,硅颗粒形状也不断改善,因此合金的塑性和质量系数也不断提高。但是,当钛含量超过 0.10% 时,过高的钛含量不但不能使合金晶粒尺寸得到进一步细化,还很可能有部分钛以针状 TiAl_3 中间化合物的形式存在,这些脆性的 TiAl_3 中间化合物割裂了基体,增加了微裂纹形成的几率,从而使合金的塑性下降。王汝耀等^[12] 在研究钛对 A356 合金力学性能时发现了类似的现象,他们得到的钛的适宜范围是 0.08% ~ 0.10%,本实验得到的结果是钛含量为 0.10% 时,综合力学性能比较好,二者结果一致性较好。

3 结论

1) 随着钛含量的增加,合金的晶粒得到了明显细化,但钛含量超过 0.10% 时,钛对合金晶粒尺寸的细化效果下降。在钛含量相同时,电解加钛方式明显较熔配加钛方式更能细化 A356 合金的晶粒尺寸,这与前者自身带有的细小、弥散分布的 TiAl_3 质点有关。

2) 随钛含量的增加,两种合金的硅颗粒尺寸和纵横比均逐渐减小,而圆形度逐渐增大。当钛含量小于 0.10% 时,这种影响特别显著,而当钛含量大于 0.10% 时,影响明显变弱,与钛对合金晶粒尺寸的影响类似。电解加钛 A356 合金的硅颗粒的尺寸小于相应钛含量熔配加钛 A356 合金,圆形度也优于相应熔配加钛 A356 合金,但加钛方式对硅颗粒纵横比影响不系统。

3) 加钛方式和钛含量对合金强度影响较小,但对合金塑性影响较大。在整个试验钛含量范围内,电解加钛的 A356 合金伸长率均优于熔配加钛

的 A356 合金伸长率。随着钛含量的增加, 二者的延伸率均呈现先增加后降低的趋势, 当钛含量达到 0.10% 时, 两种合金具有最佳的伸长率, 伸长率分别较不含钛 A356 合金提高 46% 和 29%。

REFERENCES

- [1] Miller W S, Zhuang L, Bottema J, et al. Recent development in aluminium alloys for the automotive industry[J]. *Materials Science and Engineering*, 2000, A280(1): 37 - 49.
- [2] Murty B S, Kori S A, Chakraborty M. Grain refinement of aluminium and its alloys by heterogeneous nucleation and alloying[J]. *International Material Reviews*, 2002, 47(3): 3 - 29.
- [3] Greer A L. Grain refinement of alloys by inoculation of melts[J]. *Phil Trans R Soc Lond*, 2003, A361, 479 - 495.
- [4] Kori S A, Murty B S, Chakraborty M. Development of an efficient grain refiner for Al-7Si alloy[J]. *Mater Sci Technol*, 2000, A280(1): 58 - 61.
- [5] QIU Zhur-xian, ZHANG Ming-jie, YU Ya-xin, et al. Formation of aluminium-titanium alloys by electrolysis and by thermal reduction of titania in cryolite-alumina melts[J]. *Aluminium*, 1988, 64(6): 606 - 609.
- [6] QIU Zhur-xian, YU Ya-xin, ZHANG Ming-jie. Preparation of Al-Ti-B master alloys by thermal reduction and electrolysis reduction and electrolysis of B₂O₃ and TiO₂ in cryolite-alumina melts[J]. *Aluminium*, 1988, 64(12): 1254 - 1257.
- [7] 杨升, 杨冠群, 顾松青. 电解法生产铝基合金[J]. *特种铸造及有色金属*, 2001(2): 102 - 104.
YANG Sheng, YANG Guann-qun, GU Song-qing. The production of aluminium alloys by electrolytic method[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2001(2): 102 - 104.
- [8] WANG Rur-yao, LU Weir-hua, Hogan L M. Self-modification in direct electrolytic Al-Si alloys (DEASA) and its structural inheritance[J]. *Materials Science and Engineering*, 2003, A348(1/2): 289 - 298.
- [9] 刘忠侠, 宋天福, 谢敬佩, 等. 低钛铝合金的电解生产与晶粒细化[J]. *中国有色金属学报*, 2003, 10(5): 1257 - 1261.
LIU Zhong-xia, SONG Tian-fu, XIE Jing-pei, et al. Production and grain refinement of direct electrolytic low-titanium aluminium alloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2003, 10(5): 1257 - 1261.
- [10] LIU Zhir-yong, WANG Ming-xing, WENG Yong-gang, et al. Grain refinement effect and mechanism of Al based alloy containing low-content Ti produced by electrolysis[J]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2002, 12(6): 1121 - 1126.
- [11] 范广新, 王明星, 刘志勇, 等. 电解加钛与熔配加钛对工业纯铝晶粒细化作用的研究[J]. *中国有色金属学报*, 2004, 14(2): 250 - 254.
FAN Guang-xin, WANG Ming-xing, LIU Zhir-yong, et al. Study on the grain refinement effects of titanium added to commercial pure aluminum by electrolysis and by master alloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2004, 14(2): 250 - 254.
- [12] 王汝耀, 鲁薇华. 钛对 AlSi₇Mg_{0.3} 合金力学性能的影响[J]. *特种铸造及有色金属*, 1999(1): 16 - 17.
WANG Rur-yao, LU Weir-hua. The effect of titanium on the mechanical properties of AlSi₇Mg_{0.3} alloys[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 1999(1): 16 - 17.
- [13] Venkateswarlu K, Das S K, Chakraborty M, et al. Influence of thermo-mechanical treatment of Al-5Ti master alloy on its grain refining performance on aluminium[J]. *Materials Science and Engineering*, 2003, A351: 237 - 243.
- [14] 李双寿, 朱跃峰, 曾大本, 等. 原料组织遗传性及其在铸造铝合金中的应用[J]. *铸造*, 1999(8): 53 - 58.
LI Shuang-shou, ZHU Yaofeng, ZENG Daben, et al. The structure heredity of raw material and application in casting aluminium alloys[J]. *Foundry*, 1999(8): 53 - 58.
- [15] Sigworth G K, Shivkumer S, Apelian D. The Influence of molten metal processing on mechanical properties of cast Al-Si-Mg alloys[J]. *AFS Transaction*, 1989, 97: 811 - 824.
- [16] Caceres C H, Griffiths J R. Damage by the cracking of silicon particles in an Al-7Si-0.4Mg casting alloy[J]. *Acta Mater*, 1996, 44(1): 25 - 33.
- [17] Heiberg G, Nogita K, Dahle A K, et al. Columnar to equiaxed transition of eutectic in hypoeutectic aluminium-silicon alloys[J]. *Acta Materialia*, 2002, 50: 2537 - 2546.
- [18] Criado A J, Martínez J A, Calabrés R. Growth of eutectic silicon from primary silicon crystals in aluminium-silicon alloys[J]. *Scripta Materialia*, 1997, 36(1): 47 - 54.
- [19] Cáceres C H. Microstructure effects on the strength-ductility relationship of Al-7Si-Mg casting alloys[J]. *Mater Sci Forum*, 2000, 331 - 337: 223 - 228.
- [20] Kobayashi T. Strength and fracture of aluminium alloys[J]. *Mater Sci Eng*, 2000, A280(1): 8 - 16.

(编辑 何学锋)