

Al-7Si-0.35Mg 合金的强韧化设计

王旭 李道秀 赵凯 刘桂亮 孙谦谦 韩梦霞 钱钊 刘相法
(山东大学材料液固结构演变与加工教育部重点实验室)

摘要 采用 Al-TCB 晶种合金 (TCB 指 B 掺杂型 TiC 以及 C 掺杂型 TiB₂ 两种粒子的简称) 对 Al-7Si-0.35Mg 合金 (A356 合金) 进行强韧化设计, 通过直读式光谱仪、光学显微镜、场发射扫描电镜、万能试验机等对 A356 铝合金的化学成分、微观组织及力学性能进行了测试和分析。结果表明, Al-TCB 晶种合金不仅具有优异的抗 Si 致细化“中毒”能力, 而且还可以通过调整加入量对该合金实现强韧化设计。加入质量分数为 0.2%、0.5% 和 1.0% 的 Al-TCB 晶种合金后, A356 铝合金的 α -Al 晶粒被显著细化, 平均晶粒尺寸由 1 135 μm 分别细化至 140、90 和 91 μm ; 屈服强度分别提高了 6.0%、10.0% 和 8.0%, 抗拉强度分别提高了 4.8%、8.1% 和 7.1%, 伸长率也分别提高了 40.7%、72.2% 和 77.8%。力学性能的提高主要归因于 α -Al 晶粒的细化以及其对共晶 Si 均匀化分布的改善。

关键词 Al-7Si-0.35Mg 合金; Al-TCB 晶种合金; 晶粒细化; 强韧化

中图分类号 TG146.21 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.09.015 开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Strengthening and Toughening Design of Al-7Si-0.35Mg Alloy

Wang Xu, Li Daoxiu, Zhao Kai, Liu Guiliang, Sun Qianqian, Han Mengxia, Qian Zhao, Liu Xiangfa
[Key Laboratory for Liquid-Solid Structural Evolution & Processing of Materials(Ministry of Education),
Shandong University]

Abstract: Strengthening and toughening design was conducted on the Al-7Si-0.35Mg (abbreviation for A356) alloy by using Al-TCB master alloy (TCB refers to the abbreviation of B-doped TiC and C-doped TiB₂ particles). The chemical composition, microstructure and mechanical properties of the alloy were tested and analyzed by X-ray emission spectrometer, optical microscope, field-emission scanning electron microscope and universal testing machine, respectively. The results indicate that the Al-TCB master alloy exhibits excellent refinement ability with anti-Si “poisoning”, and strengthening and toughening can be achieved by adjusting the amount of addition. After adding 0.2%, 0.5% and 1.0% Al-TCB master alloy, the α -Al grains of A356 aluminum alloy are significantly refined, and the average grain size is reduced from 1 135 μm to 140 μm , 90 μm and 91 μm , respectively. The yield strength of A356 aluminum alloy is increased by 6.0%, 10.0% and 8.0%, the tensile strength is increased by 4.8%, 8.1% and 7.1%, and the elongation is also increased by 40.7%, 72.2% and 77.8%, respectively. The enhancement of mechanical properties is mainly attributed to the refinement of α -Al grains and homogenization distribution of eutectic Si.

Key Words: Al-7Si-0.35Mg Alloy, Al-TCB Master Alloy, Grain Refinement, Strengthening and Toughening

近年来,全球汽车产业迅猛发展,世界汽车保有量持续快速增长,由此带来的能源压力和环境问题日益严重。为解决上述问题,各国广泛采用铝等轻质合金代替钢铁生产结构件,以实现汽车的轻量化。研究认为,汽车自重每减少 50 kg,其每升油的行程增加 1 km^[1],油耗可降低约 6.7%。另一种评价指标认为^[2-3],车身自重

每减少 3%,平均油耗可减少 1%~3%。由此可见汽车轻量化对缓减能源危机、降低环境污染具有积极意义。

Al-7Si-0.35Mg 合金 (A356 合金) 具有密度小、比强度高、耐腐蚀性好以及铸造性能优良等特点,大量用于制造汽车轮毂以及汽车发动机缸体、缸盖等重要零部件^[4-6],是实现汽车轻量化的主要基础材料。然而,

收稿日期:2022-10-10;修改稿收到日期:2022-11-25
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52071189, 52171182);山东省重大科技创新工程资助项目(2021ZLGX01);山东大学青年学者未来计划资助项目

第一作者简介:王旭,男,1997 年出生,硕士研究生,济南(250061),E-mail:w15254137025@163.com
通信作者:钱钊,男,1984 年出生,教授,济南(250061),E-mail:qianzhao@sdu.edu.cn
引用格式:王旭,李道秀,赵凯,等. Al-7Si-0.35Mg 合金的强韧化设计[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(9):1 246-1 251.
WANG X, LI D X, ZHAO K, et al. Strengthening and toughening design of Al-7Si-0.35Mg alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(9):1 246-1 251.

A356 铝合金在铸造过程中会形成粗大的 α -Al 晶粒,导致铸件中产生缩松、气孔及成分偏析等铸造缺陷,降低铸件的组织致密性,损害铸件的力学性能^[7-8]。此外,随着再生铝越来越受到关注,铸造 Al-Si 合金中因 Fe 含量过高而塑性降低的难题也亟待解决。

通常情况下在铸造过程中加入 Al-Ti-C 或 Al-Ti-B 中间合金^[9],以期细化 α -Al 晶粒,减少缺陷,提高强韧性。然而,细化 A356 铝合金时,均会发生 Si 致细化“中毒”现象^[10-12]。如在 A356 铝合金中加入 Al-Ti-C 中间合金时, Si 会加剧 TiC 向 Al_4C_3 的转变^[13-14];而采用 Al-Ti-B 中间合金时, Si 会偏聚在辅助 TiB_2 形核的 $TiAl_3$ 中并与之反应,使复相形核机制失效而失去细化效果^[15]。因此,如何实现 Al-Si 合金的细化,特别是应用量大且广泛的 A356 铝合金的高效细化是亟待解决的行业共性难题。

另外,同时提高铝合金的强度及塑性,从而制备出高强韧 A356 铝合金一直是材料学者们追求的目标。本研究提出了一种简便高效的铝合金强韧化方式,即通过控制 Al-TCB 晶种合金的加入量来调控 A356 铝合金组织与力学性能,旨在为其应用拓展提供参考。

1 材料与方法

1.1 合金制备过程

试验所用原料为工业纯铝(纯度为 99.7%,质量分数,下同)、工业纯 Si(纯度为 99%)、Al-50Mg、Al-10Sr 中间合金、Al-TCB 晶种合金(含 B 掺杂型 TiC 以及 C 掺杂型 TiB_2 两种粒子,以下简称 Al-TCB),合金的制备过程如下。

(1)配制 A356 铝合金 将工业纯铝放入电阻炉中,调节炉温至 $(760\pm 10)^\circ\text{C}$,待其完全熔化后去除 Al 熔体表面氧化皮,然后向铝液中加入工业纯 Si。待工业纯 Si 溶解后,调节炉温至 720°C 后向熔体中加入 Al-50Mg 中间合金,保温 15 min。

(2)变质及细化处理 向熔体中加入 0.3% 的 Al-10Sr 中间合金并继续保温 15 min;然后,将预热的 Al-TCB(加入量分别为 0、0.2%、0.5% 和 1.0%,对应为 1~4 号合金)加入到熔体中,并用石墨棒搅拌,使之均匀分布在熔体中,搅拌完成后,保温 15 min。

(3)精炼处理及浇注 对熔体进行精炼处理,然后放回电阻炉中保温,控制熔体温度为 $(720\pm 10)^\circ\text{C}$ 并静置 15 min,然后浇入抗拉试棒模具及 KBI 环形模具,模具预热温度为 $(300\pm 10)^\circ\text{C}$ 。

1.2 组织表征及性能测试

利用 PE8000 型直读式光谱仪对制备的合金进行

成分分析,将待测面加工成清洁无污染的表面,在待测面上至少取 3 个点进行测试,取平均值,见表 1。采用王水($\varphi_{\text{HCl}}:\varphi_{\text{HNO}_3}:\varphi_{\text{HF}}:\varphi_{\text{H}_2\text{O}}=6:3:0.5:0.5$)腐蚀 KBI 铸锭的底面,观察试样晶粒大小,并采用截线法评价合金的平均晶粒尺寸。使用光学显微镜(KH-2200)、场发射扫描电镜(JSM-7500F)对 Al-TCB 的物相、微观组织以及 A356 铝合金的微观组织、室温拉伸断口进行分析。合金的凝固相变行为采用差示扫描热分析仪(DSC 404C)进行分析。将制备的合金加工成标准拉伸试棒,见图 1。进行力学性能测试之前,对材料进行 T6 热处理($545^\circ\text{C}\times 3\text{ h}$ 固溶, $180^\circ\text{C}\times 8\text{ h}$ 时效),热处理完成后在 CMT700 型万能试验机上进行测试。按照 GB/T288.1-2010 标准进行室温拉伸性能测试,拉伸速率为 2 mm/min ,每个试样至少测试 3 组取平均值。布氏硬度测试在 HBST-3000AET 数字布氏硬度计上进行,压头直径为 $\phi 5\text{ mm}$,载荷为 $2\,452\text{ N}$,保压时间为 12 s ,每个试样至少测 5 个硬度值,取平均值。

表 1 不同 TCB 加入量下合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of alloys with various TCB

addition						%
合金	w_B					
	Si	Mg	Fe	Ti	B	Al
1	6.83	0.356	0.179	0.000 4	0.000 5	余量
2	7.05	0.352	0.155	0.002 8	0.001 1	余量
3	6.95	0.338	0.149	0.005 9	0.001 9	余量
4	7.06	0.368	0.171	0.012 0	0.003 6	余量

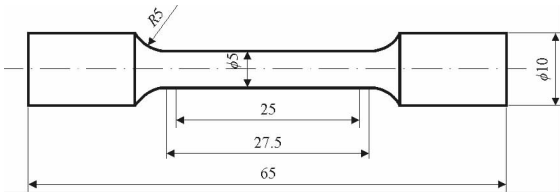


图 1 拉伸试样示意图^[16]

Fig.1 Schematic diagram of tensile specimens

2 试验结果与分析

2.1 Al-TCB 的微观组织

图 2 为 Al-TCB 的 SEM 组织及 EDS 线扫描结果。可以看出,白色粒子在基体上均匀分布。高倍 SEM 组织照片表明, Al-TCB 中的粒子存在微、纳两种尺度。EDS 线扫描显示,该粒子同时含有 Ti、C、B 等 3 种元素,可作为 α -Al 晶粒的有效形核衬底^[17]。对 Al-TCB 中的粒子尺寸分布进行统计,其平均粒径为 $0.68\text{ }\mu\text{m}$,见图 3。在 Al-TCB 中, Ti、C、B 等 3 种元素在晶种中存在形式为 B 或 C 原子分别掺杂于 TiC_x/TiB_2 固有的原子空位,同时保持了 TiC_x/TiB_2 的晶体结构^[18-19]。

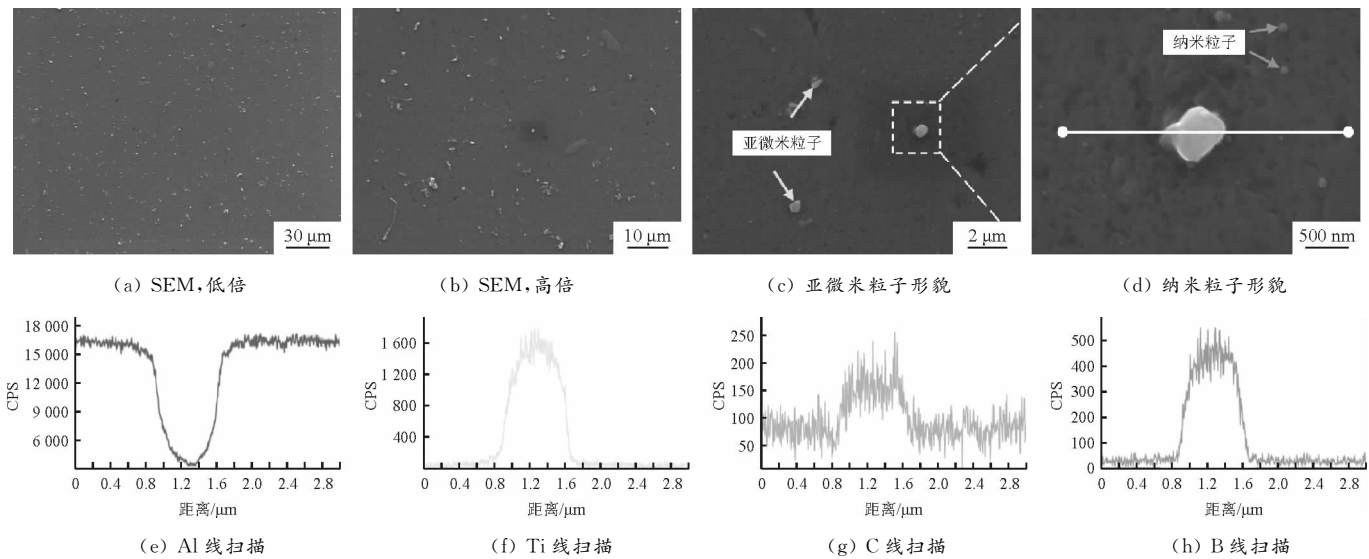


图 2 Al-TCB 的微观组织及 EDS 线扫描图

Fig.2 Microstructure and EDS linear scanning of Al-TCB alloy

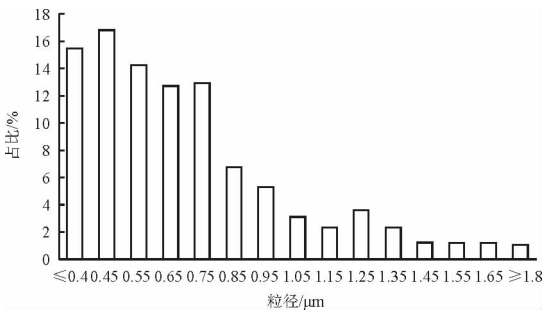


图 3 Al-TCB 粒子尺寸分布统计(平均粒径为 0.68 μm)
Fig.3 Statistics of particle size distribution of Al-TCB alloy

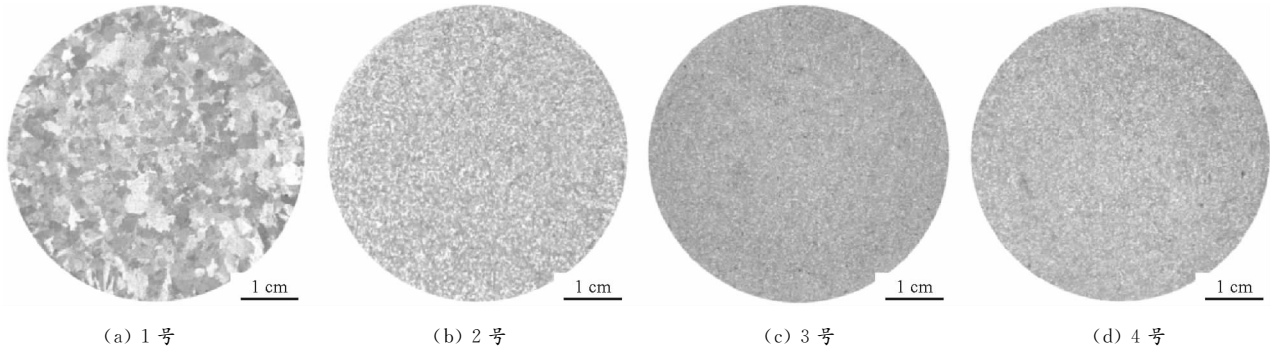


图 4 加入 Al-TCB 前后 A356 铝合金的宏观晶粒大小

Fig.4 Macroscopic dimension of A356 aluminum alloys before and after Al-TCB addition

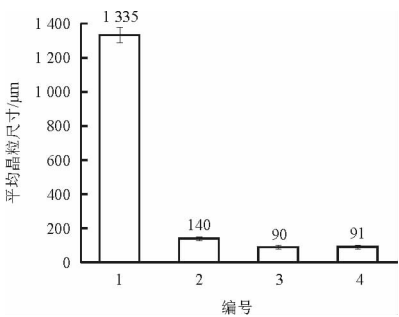


图 5 加入 Al-TCB 前后 A356 铝合金的平均晶粒尺寸
Fig.5 Average grain size of A356 aluminum alloy
before and after Al-TCB addition

2.2 Al-TCB 对 A356 铝合金的组织调控

图 4 和图 5 为 A356 铝合金添加 Al-TCB 前后的晶粒组织照片及平均晶粒尺寸统计图。由图 4a 可见,未添加 Al-TCB 时,A356 铝合金中的 α -Al 晶粒十分粗大,晶粒的形貌不规则,尺寸差别较大,利用截线法测量其平均晶粒尺寸为 $(1\ 135\pm45)\ \mu\text{m}$;加入 0.2% 的 Al-TCB 后, α -Al 晶粒得到显著细化,其平均晶粒尺寸为 $(140\pm10)\ \mu\text{m}$,见图 4b;当 Al-TCB 的添加量增加到 0.5% 时, α -Al 晶粒被进一步细化,其平均晶粒尺寸为

$(90\pm8)\ \mu\text{m}$,见图 4c;进一步提高 Al-TCB 的添加量至 1.0% 时,合金的晶粒细化效果与 4c 相近,其平均晶粒尺寸为 $(91\pm8)\ \mu\text{m}$,见图 4d。

图 6 为加入 Al-TCB 前后 A356 铝合金在降温过程中的 DSC 曲线。可以看出,A356 铝合金的凝固起始温度为 $604\ ^\circ\text{C}$,加入 Al-TCB 后,A356 铝合金的凝固起始温度变为 $614\ ^\circ\text{C}$ 。这表明,在 A356 铝合金中加入 Al-TCB 后,合金凝固所需的过冷度要低于常规 A356 铝合金凝固所需的过冷度,提高了 A356 铝合金的形核率,使合金中的 α -Al 晶粒尺寸得到细化。

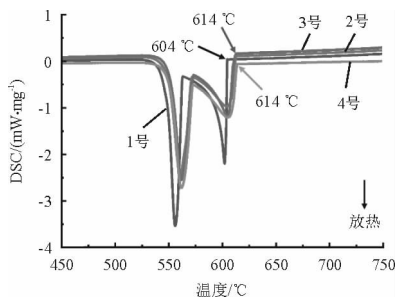


图 6 加入 Al-TCB 前后 A356 铝合金熔体冷却过程中的 DSC 曲线

Fig.6 DSC curves of A356 aluminum alloy melt during cooling before and after adding Al-TCB

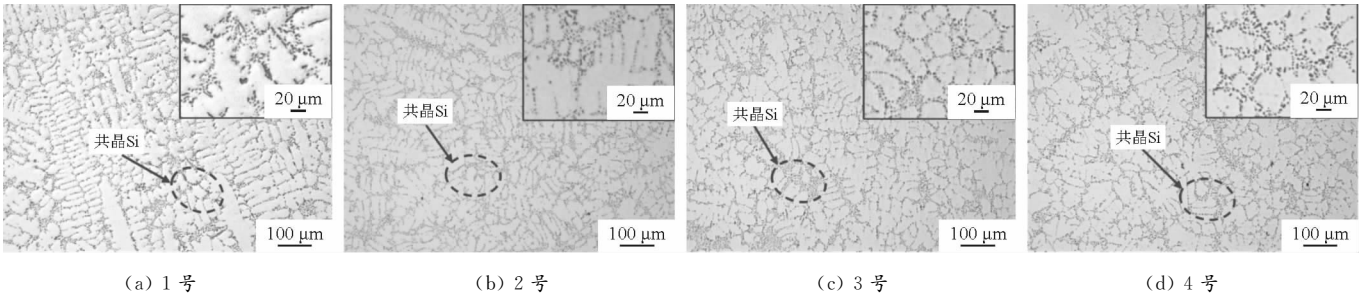


图 7 T6 热处理后 A356 铝合金的微观组织

Fig.7 Microstructure of A356 aluminum alloy after T6 heat treatment

2.3 Al-TCB 对 A356 铝合金的强韧化

A356 铝合金是一种可热处理强化的 Al-Si 合金，因此 T6 热处理可有效提高其力学性能。图 8 为添加不同含量 Al-TCB 时 A356 铝合金的室温拉伸工程应力-应变曲线。可以看出，1 号合金的屈服强度和抗拉强度分别为 250 MPa 和 310 MPa，加入 0.2% 的 Al-TCB 后，2 号合金的屈服强度和抗拉强度有所提高，分别为 265 MPa 和 325 MPa，提升了 6.0% 和 4.8%；当 Al-TCB 的添加量为 0.5% 时，3 号合金的屈服强度和抗拉强度分别提升至 275 MPa 和 335 MPa，相对 1 号合金提高了 10.0% 和 8.1%；加入 1.0% Al-TCB 的 4 号合金与 3 号合金的拉伸性能相近，其屈服强度和抗拉强度分别为 270 MPa 和 332 MPa，相较于 1 号合金提升了 8.0% 和 7.1%。相比强度而言，Al-TCB 对 A356 铝合

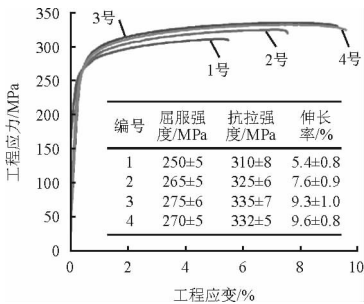


图 8 不同 Al-TCB 添加量下 A356 铝合金应力-应变曲线

Fig.8 Stress-strain curves of A356 aluminum alloy under different Al-TCB additions

A356 铝合金未进行 T6 热处理时，共晶 Si 的形貌主要呈针片状且偏聚严重，针片状的共晶 Si 会割裂基体，严重损害 A356 铝合金的力学性能。因此，使用前必须对 A356 铝合金进行必要的 T6 热处理。图 7 为热处理后的 A356 铝合金组织照片。可以看出，经过 T6 热处理后，共晶 Si 形貌均变为了球状或短杆状。由于凝固过程中的共晶反应，共晶 Si 主要分布在初生 α-Al 晶粒的周围，因此 Al-TCB 诱导的 α-Al 晶粒细化使得共晶 Si 分布更加均匀。另外，局部放大图可以看出，在相同的热处理工艺下，Al-TCB 的引入使 A356 铝合金中共晶 Si 的球化更充分。

金伸长率的提高更加显著。1 号合金的伸长率为 5.4%，加入 0.2%、0.5%、1.0% 的 Al-TCB 后，合金的伸长率为 7.6%、9.3%、9.6%，分别提高了 40.7%、72.2% 和 77.8%，这为再生铝中伸长率不足的问题提供了一种解决思路。

图 9 为 Al-TCB 添加量与 A356 铝合金布氏硬度的关系图。可以看出，1 号合金的硬度 (HBW) 为 96.6±1.1，加入 0.2%、0.5%、1.0% 的 Al-TCB 后，2 号、3 号和 4 号合金的硬度 (HBW) 为 104.2±1.0、106±0.9、105.2±1.0，分别提高了 7.9%、9.7% 和 8.9%。该结果同图 8 的屈服强度结果一致，协同说明了 Al-TCB 可以有效提高 A356 铝合金的综合力学性能。

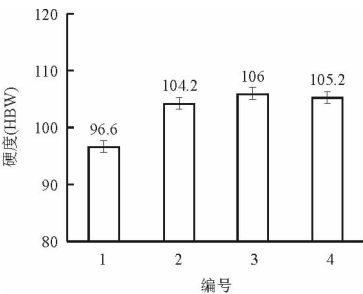


图 9 不同 Al-TCB 添加量下 A356 铝合金布氏硬度对比图

Fig.9 Brinell hardness of A356 aluminum alloy with different Al-TCB additions

2.4 强化机制

研究表明，Al-TCB 能提高 A356 铝合金的强韧性，

从细晶强化和沉淀强化两方面来揭示合金的强化机制。

(1)晶粒尺寸的影响 Al-TCB 可以提供形核质点,促进 α -Al 晶粒形核,减小 α -Al 晶粒的尺寸,增加晶界在材料中占比。一般而言,晶粒越小,晶界越多,其对位错运动的阻碍就越大,位错滑移会更加困难。材料的屈服强度与平均晶粒尺寸之间的关系可通过霍尔-佩奇(Hall-Petch)公式^[20]进行量化:

$$\sigma_s = \sigma_0 + k d^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中, σ_s 为多晶体屈服强度; σ_0 为常数,相当于单晶体的屈服强度; k 为与晶体类型有关的常数,反映晶界对材料强度影响的程度; d 为晶粒的平均直径。由式(1)可知,材料的屈服强度随着晶粒平均直径的减小而增大,因此 Al-TCB 细化 A356 铝合金中的 α -Al 晶粒后,合金的屈服强度和布氏硬度得到提高。受到外力时,合金中晶粒尺寸越小,晶粒内部产生的变形越均匀,单个晶粒受到的应力降低,因应力集中引起的开裂概率也相应变小,合金在断裂前可承受较大的变形量,因此表现出优异的塑性。屈服强度及塑性的同步提高会带来抗拉强度的改善^[21]。另一方面,晶粒尺寸的减小会使分布在晶界处的共晶 Si 尺寸减小且分布更加均匀(见图 7),有

利于减少材料的应力集中,提高材料的力学性能。

(2)强化相的影响 A356 铝合金是一种可热处理强化的 Al-Si 合金,对其进行热处理强化后可有效提高其力学性能。A356 铝合金常规的热处理为固溶处理+时效处理,固溶处理可获得过饱和 α -Al 固溶体,并且在固溶过程中共晶 Si 相会由原来的针片状转变为粒状或圆球状^[22]。观察 T6 热处理后的 A356 铝合金微观组织,发现共晶 Si 的形貌为粒状或圆球状,这种形貌改变可以有效降低材料的应力集中,提高材料的塑性(见图 7)。时效处理阶段, α -Al 基体中会析出纳米 Mg_2Si 相,这种纳米增强相可以阻碍位错运动,从而提高合金的强度,这符合 Orowan 强化机制^[23]。与此同时,晶界数量的增多会使强化相的析出更加弥散,强化相的弥散分布会使材料的力学性能进一步提高。

图 10 为添加不同含量 Al-TCB 时 A356 铝合金室温拉伸断口的 SEM 图片。可以看出,1 号合金断口处的部分断面平整,呈解理断裂特征,韧窝数量较少且深度浅,因此合金的塑性较差。加入 0.2%、0.5%、1.0% 的 Al-TCB 后,合金的室温拉伸断口中韧窝数量明显增多,韧窝细小且均匀,韧窝的深度加深。材料在拉伸过

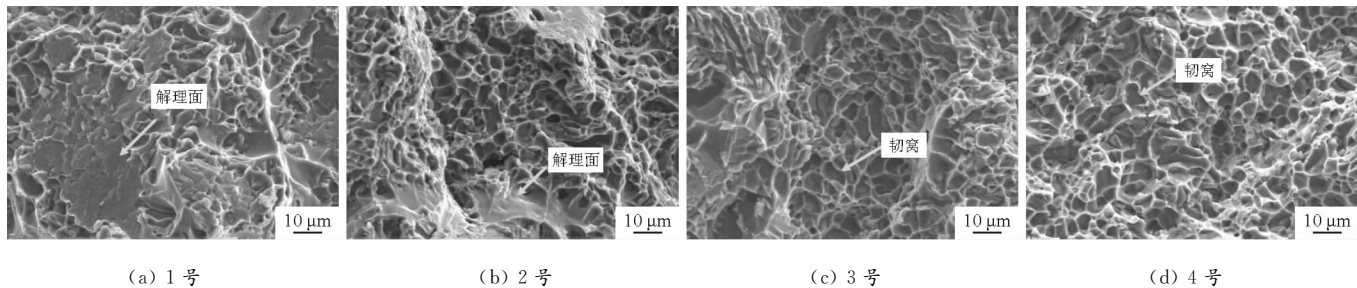


图 10 A356 铝合金室温拉伸断口形貌

Fig.10 Fracture morphologies of A356 aluminum alloys

程中可以承受更多的应力应变,其力学性能得到提升。

随着 Al-TCB 含量增加,A356 铝合金的力学性能出现波动,当 Al-TCB 的添加量从 0.2% 增加到 0.5% 时,A356 铝合金的晶粒得到进一步细化,其抗拉强度也由 325 MPa 增加到 335 MPa,增加了 3.1%;当 Al-TCB 的添加量从 0.5% 增加到 1.0% 时,A356 铝合金的晶粒尺寸相差不大,其力学性能也基本一致。相比强化相,晶粒细化对性能的影响更加显著,当加入 0.2% 的 Al-TCB 时,2 号合金的断口还存在解理面,但相比未添加 Al-TCB 的 1 号合金,解理面的占比明显减少,因此其塑性提高,当加入 0.5% 和 1.0% 的 Al-TCB 时,3 号和 4 号合金的断口中解理面基本消失,韧窝占比明显提高,因此其塑性均很好。

3 结 论

(1)Al-TCB 可有效细化 A356 铝合金中的 α -Al 晶粒,分别添加 0.2%、0.5%、1.0% 的 Al-TCB,其平均晶粒尺寸由 1 135 μm 可分别细化至 140、90 和 91 μm 。

(2)Al-TCB 可以显著提高 A356 铝合金的力学性能,分别加入 0.2%、0.5%、1.0% 的 Al-TCB 后,其屈服强度、抗拉强度较未添加 Al-TCB 的合金分别提高了 6.0%、10.0%、8.0% 和 4.8%、8.1%、7.1%,伸长率分别提升了 40.7%、72.2% 和 77.8%。

(3) α -Al 晶粒的细化使得 A356 铝合金中共晶 Si 分布更加均匀,使其在拉伸过程中产生的解理面减少、韧窝增多,从而显著提高合金的强韧性,尤其使伸长率

得到大幅提升。

参 考 文 献

- [1] 郑晖,赵曦雅.汽车轻量化及铝合金在现代汽车生产中的应用[J].锻压技术,2016,41(2):1-6.
- [2] 马鸣图,李志刚,易红亮,等.汽车轻量化及铝合金的应用[J].世界有色金属,2006(10):10-14.
- [3] 李玲,董建雄,黄云飞.汽车车身轻量化的研究和应用现状(上)[J].汽车与配件,2015(32):68-71.
- [4] AGUIRRE-DE L T E, PÉREZ-BUSTAMANTE U R, CAMARILLO-CISNEROS J, et al. Mechanical properties of the A356 aluminum alloy modified with La/Ce[J]. Journal of Rare Earths, 2013, 31(8): 811-816.
- [5] 李敬勇,赵勇,陈华斌.A356Al/TiB₂颗粒增强铝基复合材料的搅拌摩擦焊[J].材料工程,2005(1):29-36.
- [6] NIKLAS A, ABAUNZA U, FERNÁNDEZ-CALVO A I, et al. Thermal analysis as a microstructure prediction tool for A356 aluminum parts solidified under various cooling conditions[J]. China Foundry, 2011, 8(1): 89-95.
- [7] 郑方超.新型 Al-5Ti-1B-7Sm 细化变质剂对亚共晶 Al-Si 合金组织及性能的影响[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2017.
- [8] 王狂飞,张锦志,李早,等.熔体处理对 ZL114A 合金石膏型精铸件的影响[J].特种铸造及有色合金,2018,38(10):1 096-1 099.
- [9] 姚丽娟,朱满,坚增运,等.Al-Si 合金的晶粒细化与凝固行为研究[J].热加工工艺,2020,49(15):9-11,15.
- [10] LI Y, HU B, LIU B, et al. Insight into Si poisoning on grain refinement of Al-Si/Al-5Ti-B system [J]. Acta Materialia, 2020, 187: 51-65.
- [11] XU J, LI Y, MA K, et al. In-situ observation of grain refinement dynamics of hypoeutectic Al-Si alloy inoculated by Al-Ti-Nb-B alloy [J]. Scripta Materialia, 2020, 187: 142-147.
- [12] WANG Y, QUE Z, HASHIMOTO T, et al. Mechanism for Si poisoning of Al-Ti-B grain refiners in Al alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2020, A51(11): 5 743-5 757.
- [13] 张森,韩延峰,王俊,等. Al-Ti-C 中间合金研究进展[J].热加工工艺,2012,41(13):49-52,55.
- [14] ZHANG G W, WANG Z J, NIU J W, et al. Enhanced fluidity of ZL205A alloy with the combined addition of Al-Ti-C and La[J]. Materials, 2021, 14(20): 3-6.
- [15] PRASAD A, YUAN L, LEE P D, et al. The interdependence model of grain nucleation: A numerical analysis of the nucleation-free zone[J]. Acta Materialia, 2013, 61(16): 5 914-5 927.
- [16] 姜坤,刘桂亮,赵凯,等.抗 Si“中毒”AlTiC-B 晶种合金对 ZL114 铝合金组织和力学性能的影响[J].材料导报,2021,35(16):16 076-16 080.
- [17] 李道秀,韩梦霞,张将,等.细晶 Al-Si-Mg 合金的组织遗传性与高屈服强度设计[J].材料导报,2021,35(9):9 003-9 008.
- [18] YANG H B, QIAN Z, CHEN H W, et al. A new insight into heterogeneous nucleation mechanism of Al by non-stoichiometric TiC_x [J]. Acta Materialia, 2022, 233: 2-9.
- [19] ZHAO Z Y, LI D X, ZHANG D Q, et al. Enhancement of the strength-ductility synergy of Al-Si-Mg alloys via C-doped TiB₂ particles[J]. Materials Letters, 2022, 328: 2-3.
- [20] CORDERO Z C, KNIGHT B E, SCHUH C A. Six decades of the Hall-Petch effect-A survey of grain-size strengthening studies on pure metals[J]. International Materials Reviews, 2016, 61(8): 495-512.
- [21] ZHANG S, WANG F, HUANG P. Enhanced Hall-Petch strengthening in graphene/Cu nanocomposites[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 87(28): 176-183.
- [22] 朱文婧.热处理对 A356 铝合金组织与性能的影响分析[J].工程技术研究,2017(5):82-83.
- [23] 蓝凯,杨弋涛.铸造铝硅系合金的时效研究与应用进展[J].精密成形工程,2022,14(3):124-132.

(编辑:栗万仲)

《特种铸造及有色合金》征稿启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管,中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,SA、CA、MA、AJ、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然学术期刊等。

本刊面向国内外广大科技工作者征稿,征稿内容包括:各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料的成形理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,此外还包括各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、新能源材料、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术和技术研究成果等。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司



地址:武汉市江岸区九万方路 26 号

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024

传真:027-85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

