

Al-Ti-C-B 细化剂对 A356 铝合金组织和性能的影响

张 将 彭银江 朱鸿磊 洪晓露 徐 英 刘永强 陈大辉 侯林冲
(中国兵器科学研究院宁波分院)

摘 要 通过添加 Al-Ti-C-B 细化剂,研究了 Ti、C、B 元素对 A356 合金中 α -Al 相及力学性能的影响。结果表明,A356 合金中加入 Al-Ti-C-B 能显著细化 α -Al 枝晶尺寸至 150 μm 以下,微观组织更加均匀,且细化剂最佳添加量为 1.0% (质量分数,下同),合金的抗拉强度为 320.8 MPa,伸长率为 10.0%。进一步研究表明,Al-Ti-C-B 中间合金中含有 TCB 粒子,能够作为初生 α -Al 的有效形核质点,从而对 A356 合金具有高效、长效、稳定的细化效果。

关键词 AlTiCB; A356 铝合金; 微量元素

中图分类号 TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.11.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Influence of Al-Ti-C-B Refiner on the Properties and Microstructure of A356 Alloy

Zhang Jiang, Peng Yinjiang, Zhu Honglei, Hong Xiaolu, Xu Ying, Liu Yongqiang,
Chen Dahui, Hou Linchong
(Ningbo Branch of China Academy of Ordnance Science)

Abstract: The effects of Al-Ti-C-B master alloy on microstructure and mechanical properties of A356 alloy were investigated. The results indicate that the addition of AlTiCB to A356 alloy can significantly refine the α -Al dendrite, and the grain size can be refined to less than 150 μm . The microstructure becomes more uniform, and the desirable addition amount of trace element AlTiCB is 1.0%, where tensile strength and elongation of the alloy reaches the highest value of 320.8 MPa and 10.0%. The TCB particles existing in the Al-TiCB seed alloy play a role of the effective nucleation particle of the primary α -Al, contributing to efficient, long-lasting and stable refining effect on A356 alloy.

Key Words: AlTiCB, A356 Aluminum Alloy, Trace Element

A356 合金主要用于制造汽车轮毂,其组织主要由初生 α -Al 固溶体和共晶 Si 相组成。轮毂承受载荷时,在共晶 Si 相棱角处产生应力集中,易在该处引发微裂纹,极大地降低轮毂强度、塑性,因而限制了其在高规格、大尺寸重载汽车轮毂上的应用。一般采用熔体净化、变质、细化和热处理等手段改善 A356 合金轮毂的性能^[1,2]。

目前,欧美等地区发达国家大尺寸规格的 A356 合金轮毂已经在大型运载车辆上得到应用。郭有军等^[3]利用 Al-Ti-B 直接变质和细化 A356 铝合金原铝液,通过对比变质前后的组织性能,发现当添加 0.65% 的 Al-Ti-B 时,力学性能较好。仲志国等^[4]、MILLER W S 等^[5]对比研究了 B、RE、La 对锍变质 A356 铝合金微观组织和力学性能的影响,发现经 0.01% 的 Ti、0.03% 的 B 联合细化和 0.04% 的 Sr 变质的 A356 铝合金晶粒细

小,具有较好的综合力学性能。张亮等^[6]、刘文矫等^[7]研究了熔体处理对 A356 合金组织和性能的影响,发现以磁悬浮熔炼并加入 Al-10Sr+Al-5Ti-1B-1RE 细化剂的 A356 铝合金力学性能最好,其中 Al-5Ti-1B-1RE 可降低自由能、Al-10Sr 增加异质形核从而细化晶粒尺寸。

本课题主要通过 A356 铝合金炉料中添加 Al-TiCB 细化剂,改变 A356 合金熔体中 Ti、C、B 元素的含量,对 A356 合金的细化规律进行研究,揭示有益微量元素含量对 A356 初生 α -Al 晶粒组织、力学性能的影响,建立 Al-Ti-C-B 细化剂添加量与成分、组织、力学性能之间的相关性,旨在为其应用提供参考。

1 试验材料及方法

试验材料为 A356 铝合金铸锭和 Al-Ti-C-B 中间合金(1.8%~2.5% 的 Ti,0.2%~0.5% 的 C,0.2%~0.5%

收稿日期:2020-10-19;修改稿收到日期:2021-06-10
基金项目:宁波市重大 2025 专项资助项目(2019B10099)
第一作者简介:张将,男,1988 年出生,助理研究员,浙江宁波(315000),E-mail: zhangjiangjixie062@126.com
引用格式:张将,彭银江,朱鸿磊,等. Al-Ti-C-B 细化剂对 A356 铝合金组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(11):1 416-1 419.
ZHANG J, PENG Y J, ZHU H L, et al. Influence of Al-Ti-C-B refiner on the properties and microstructure of A356 alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(11):1 416-1 419.

的 B)。

A356 铝合金铸锭在熔化保温炉中熔化后,在 730 ℃加入精炼剂除气,在 740 ℃加入 0.3% 的 Al-10Sr 进行变质处理,在 740 ℃下加入不同量的 Al-Ti-C-B 进行细化处理,采用旋转喷吹进行二次除气,最后在金属型模具中浇注标准拉伸试样^[8]。具体试样编号和试验方法的对应关系见表 1。

表 1 试样编号和试验方法的关系对应表
Tab.1 Correspondence table of relationship between number and method

编号	试验方法
0	A356+精炼+0.3% 的 Al-10Sr 变质+旋转喷吹二次精炼
1	A356+精炼+0.3% 的 Al-10Sr 变质+旋转喷吹二次精炼+0.2% 的 Al-Ti-C-B
2	A356+精炼+0.3% 的 Al-10Sr 变质+旋转喷吹二次精炼+0.5% 的 Al-Ti-C-B
3	A356+精炼+0.3% 的 Al-10Sr 变质+旋转喷吹二次精炼+1.0% 的 Al-Ti-C-B
4	A356+精炼+0.3% 的 Al-10Sr 变质+旋转喷吹二次精炼+2.0% 的 Al-Ti-C-B

试样采用 T6 热处理工艺 ($535 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C} \times 8\text{ h}$, $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水淬,中间停留 8 h , $180 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C} \times 8\text{ h}$ 时效,空冷)。

采用 ZEISS Axio Observer 金相显微镜和 Quanta FEG250 扫描电镜对试样显微组织进行观察、CMT-4015 拉伸试验机对试样的力学性能进行检测,每组 5 根以上试样取平均值。

2 试验结果及分析

2.1 Al-Ti-C-B 中间合金添加量对 A356 合金成分的影响

不同 Al-Ti-C-B 加入量下 A356 合金实测化学成分见表 2。可以看出,Ti 含量随着 Al-Ti-C-B 合金添加量的增加而增加;由于 B、C 与 Ti 元素以 Al-Ti-C-B 中间合金的形式一并加入合金熔体中,因此其含量的变化规律与 Ti 元素保持一致。另外,各组的 Mg 和 Sr 含量均存在一定差异,其原因在于,一方面可能存在熔炼过程中的元素烧损或凝固过程中的成分偏析;另一方面,即

便是同一个试样,在不同的部位也会存在成分偏差。

表 2 A356 合金的化学成分
Tab.2 Chemical composition of A356 alloy %

编号	w_B					
	Si	Mg	Ti	Fe	Sr	Al
0	6.70	0.370	0.000 4	0.144	0.021 2	余量
1	7.15	0.347	0.000 8	0.127	0.015 3	余量
2	6.22	0.296	0.005 4	0.134	0.016 7	余量
3	6.76	0.383	0.018 1	0.112	0.015 9	余量
4	6.51	0.345	0.034 7	0.109	0.018 6	余量

2.2 Al-Ti-C-B 中间合金添加量对 A356 合金组织的影响

图 1 和图 2 是不同 Al-Ti-C-B 合金添加量时 A356 合金的宏观和微观组织。未添加 Al-Ti-C-B 的 A356 合金宏观晶粒组织与微观组织分别见图 1a 和图 2a,其 α -Al 枝晶非常发达,晶粒尺寸可达数 mm,二次枝晶臂间距约为 $30\text{ }\mu\text{m}$,且存在共晶组织不均匀分布现象。当 Al-Ti-C-B 中间合金加入后, α -Al 枝晶显著细化,且随着其添加量的增加, α -Al 逐渐由发达的枝晶形貌演变为花瓣状的等轴晶,二次枝晶逐渐消失,这是由于 Al-Ti-C-B 晶种合金的加入,形成 Al_3Ti 、 TiB_2 、 TiC 等颗粒相起到异质形核或促进形核的作用,使 A356 合金凝固时获得细小的晶粒组织,其中 Al_3Ti 、 TiC 可成为 α -Al 的异质核心, TiB_2 可促进 Al_3Ti 形核加快,实现晶粒细化的效果,晶粒尺寸可细化至 $150\text{ }\mu\text{m}$ 以下,且合金的微观组织更加均匀。

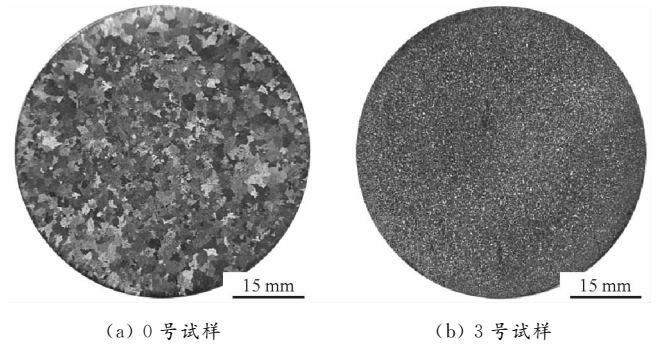


图 1 0 号和 3 号试样的宏观形貌

Fig.1 Macro morphology of specimens 0 and

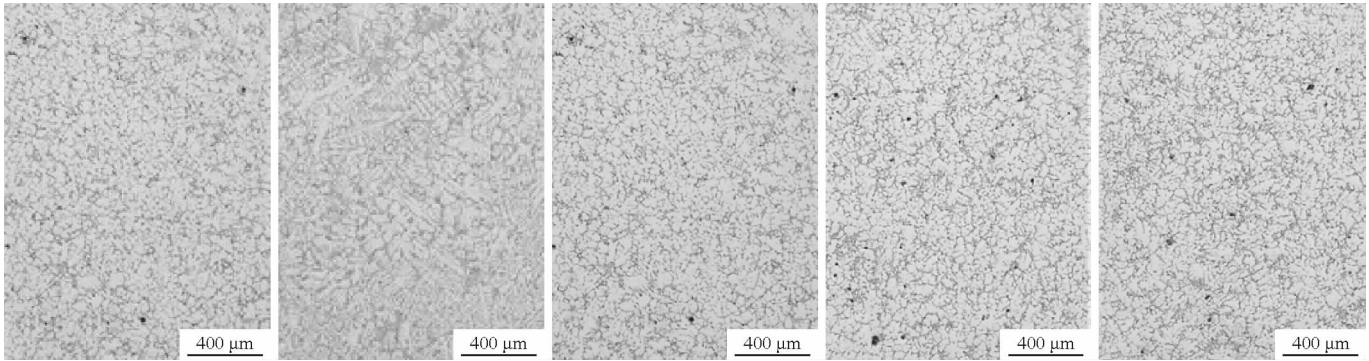


图 2 不同 Al-Ti-C-B 添加量下试样的微观组织

Fig.2 Microstructure of A356 alloy with varied Al-Ti-C-B addition

2.3 Al-Ti-C-B 对 A356 合金力学性能的影响

不同 Al-Ti-C-B 添加量的 A356 合金的抗拉强度及伸长率见表 3。可以看出,随着 Al-Ti-C-B 中间合金加入量增加,合金的抗拉强度和屈服强度基本呈现逐渐升高的趋势,并趋于稳定,伸长率均能够达到 10% 以上,这与晶粒尺寸越细小,强度越高的理论相符。晶粒越细小,晶粒内部和晶界附近的应变程度相差小,晶界就越多,变形抗拉就越高,位错不易滑动,导致材料抗拉强度越高。当 Al-Ti-C-B 中间合金的添加量达到 1.0% 时,合金的性能达到最高值。

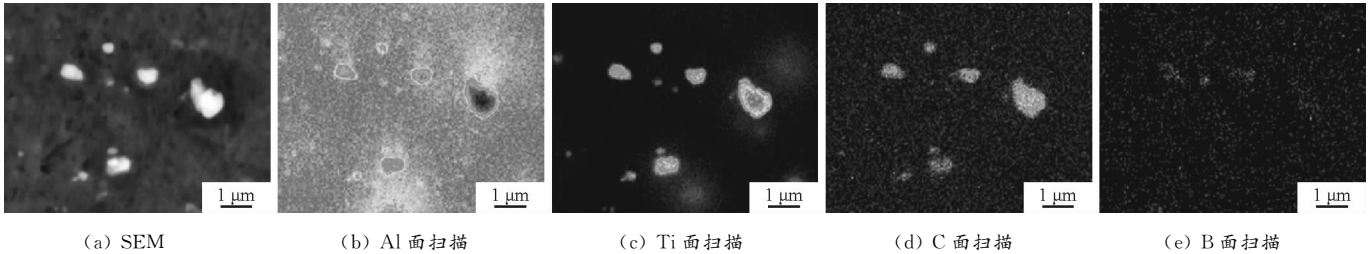


图 3 Al-Ti-C-B 中间合金中粒子的电子探针元素面分布

Fig.3 EPMA elemental mapping distribution of particles in Al-Ti-C-B seed alloy

分布的粒子多为不规则多面体状,且粒子同时包含着 Ti、C、B 等 3 种元素,在此简称其为 TCB 粒子。

为验证 TCB 粒子是 A356 中 α -Al 的有效形核核心,在添加了 Al-Ti-C-B 中间合金的 A356 合金中找到了初生 α -Al 晶粒中心包裹的形核粒子,见图 4。图 4a 虚线包围的区域为初生 α -Al 晶粒,矩形框内为形核粒子,其放大后的形貌见图 4b,该形核粒子的尺度为亚微米级,对其进行了 EDS 点分析及线分析,见图 4c 和图

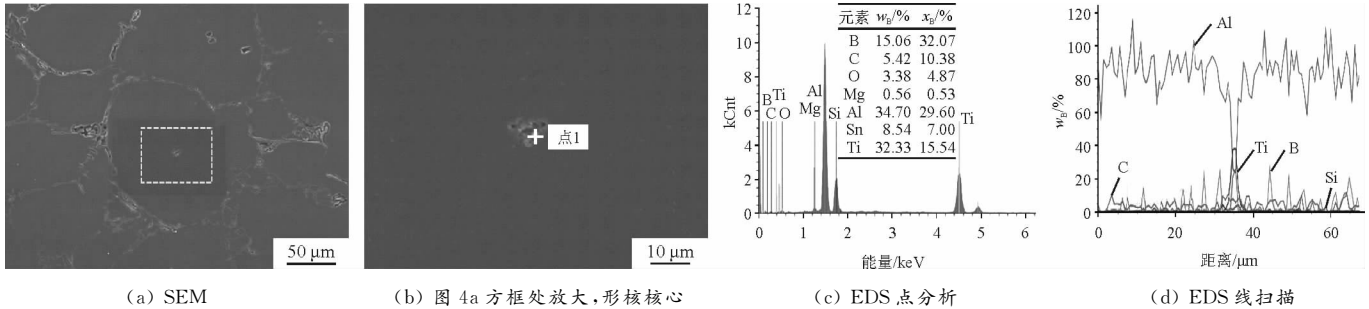


图 4 添加 Al-Ti-C-B 中间合金的 A356 合金中的形核粒子及其 EDS 分析

Fig.4 Nucleated particles in A356 alloy with Al-Ti-C-B seed alloy and EDS analysis

3 结 论

(1)A356 合金中加入 Al-Ti-C-B 中间合金能显著细化 α -Al 枝晶,晶粒尺寸可细化至 150 μ m 以下,微观组织更加均匀,且 Al-Ti-C-B 中间合金最佳添加量为 1.0%,合金的抗拉强度为 320.8 MPa,伸长率为 10.0%。

(2)通过性能和组织对比分析可见,随着 A356 合金中微量元素 Ti、C、B 的增加,组织逐渐细化,性能呈现逐渐升高的趋势,并趋于稳定。

表 3 不同试验方案的 A356 合金力学性能

Tab.3 Mechanical properties of A356 alloy with different testing schemes

编号	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
0	307.0	246.0	10.5
1	306.0	250.0	11.5
2	310.0	250.0	10.3
3	320.8	273.3	10.0
4	318.6	260.0	12.2

2.4 添加 Al-Ti-C-B 中间合金的 A356 合金的细化机理

图 3 为 Al-Ti-C-B 晶种合金中粒子的具体形貌以及对对应区域的元素面分布。可以看出,中间合金中弥散

4d。分析发现,该形核粒子中同样存在 Ti、C、B 3 种元素,由 Al-Ti-C-B 中间合金引入,成为初生 α -Al 的有效形核衬底。由于 Al-Ti-C-B 中间合金中的 TCB 粒子弥散且大多数粒子的尺寸为亚微米及纳米范围,加入到 A356 合金中后,粒子分散且不易沉淀,粒子的各个晶面能够充分地铝液接触,从而保证高的形核率,并且即使经过长时间保温之后,TCB 粒子仍能作为初生 α -Al 的有效形核衬底,使得 A356 合金的晶粒得到细化。

参 考 文 献

[1] 卢建中.A356.2 铝硅合金的生产工艺研究与应用[J]. 轻金属, 1999 (2): 50-51.

[2] NOGITA K, DRENNAN J, DAHLE A K. Evaluation of silicon twinning in hypo-eutectic Al-Si alloys[J]. Material Transactions, 2003, 44(4): 625-628.

[3] 郭有军,沈利. Al-Ti-B 对 A356 铝合金组织和性能的影响[J].世界有色金属, 2008(10):72-73.

[4] 仲志国,王爱华,孙海斌,等. B,RE,La 对锆变质 A356 铝合金微观组织及力学性能影响[J]. 热加工工艺, 2010, 39(1): 6-9.

电梯安全钳用 Cu-1.9Be-0.25Co 合金高温拉伸行为研究

周延军^{1,2} 高 芳³ 张文敏³ 王 磊³ 康军伟^{1,2} 张宏宇³ 马晓萍³ 姚 望³
(1.河南科技大学材料科学与工程学院; 2.有色金属新材料与先进加工技术省部共建协同创新中心;
3.河南省特种设备安全检测研究院)

摘 要 对 780 ℃×4 h 固溶+320 ℃×8 h 时效处理后的电梯安全钳用 Cu-1.9Be-0.25Co 合金进行高温拉伸试验,获得了不同试验条件下合金的应力-应变曲线和力学性能,并通过光学显微镜、扫描电镜观察其微观组织和拉伸断口形貌。结果表明,温度对时效态 Cu-1.9Be-0.25Co 合金高温条件下的抗拉强度和伸长率影响显著。随着拉伸温度升高,合金的抗拉强度从 262 MPa 逐渐下降到 24.5 MPa,伸长率和断面收缩率先升高后降低,在 730 ℃时均达到最大值,分别为 129.5% 和 99%,断面收缩率最大值持续到 780 ℃发生下降;合金的断裂机制为:500 ℃的沿晶脆性断裂+局部韧性断裂的混合断裂机制向 600、730、780、830 ℃条件下韧性断裂转变。

关键词 Cu-1.9Be-0.25Co 合金;高温拉伸行为;组织与性能

中图分类号 TG146.1 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.11.019 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



High Temperature Tensile Behavior of Cu-1.9Be-0.25Co Alloy for Elevator Safety Gear

Zhou Yanjun^{1,2}, Gao Fang³, Zhang Wenmin³, Wang Lei³, Kang Junwei^{1,2},
Zhang Hongyu³, Ma Xiaoping³, Yao Wang³
(1.Institute of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology;
2.Provincial and Ministerial Co-construction Collaborative Innovation Center of New
Materials and Advanced Processing Technology of Nonferrous Metals;
3.Special Equipment Safety Inspection and Research Institute of Henan Province)

Abstract: The high-temperature tensile tests were conducted on elevator safety Gear with Cu-1.9Be-0.25Co alloy after 780 ℃×4 h solid solution+320 ℃×8 h aging treatment. The stress-strain curve and the change rule of mechanical properties of alloy under different testing conditions were obtained, and the microstructure and tensile fracture morphology of the alloy were observed through optical microscope and scanning electron microscope. The results reveal that temperature has a significant effect on the tensile strength and elongation of the aged Cu-1.9Be-0.25Co alloy under high temperature conditions. As the tensile temperature increases, tensile strength of the alloy is gradually decreased from 262 MPa to 24.5 MPa, and the elongation and reduction of area are firstly increased and then decreased, which reach the maximum of 129.5% and 99% at 730 ℃, respectively, and the maximum reduction of area continues to decline until 780 ℃. The fracture mechanism of the alloy is transformed from the composite fracture mechanism of intergranular brittle fracture+local ductile fracture at 500 ℃ to ductile fracture at 600 ℃, 730 ℃, 780 ℃ and 830 ℃.

Key Words: Cu-1.9Be-0.25Co Alloy, High Temperature Tensile Behavior, Mechanical Properties and Microstructure

收稿日期:2021-04-29;修改稿收到日期:2021-06-15
基金项目:河南省市场监督管理局科技计划资助项目(2020sj76);河南省重点研发与推广专项基金资助项目(科技攻关)(212102210441);河南省自然科学基金青年基金资助项目(202300410139);河南省高等学校重点科研资助项目(19A430012)
第一作者简介:周延军,男,1985 年出生,讲师,河南洛阳(471023),E-mail:dazhou456@163.com
引用格式:周延军,高芳,张文敏,等. 电梯安全钳用 Cu-1.9Be-0.25Co 合金高温拉伸行为研究[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(11):1 419-1 423.
ZHOU Y J, GAO F, ZHANG W M, et al. High temperature tensile behavior of Cu-1.9Be-0.25Co alloy for elevator safety gear[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(11):1 419-1 423.

[5] MILLER W S, ZHUANG L, BOTTEMA J, et al. Recent development in aluminium alloys for the autom otive in dustry[J]. Materials Science and Engineering, 2000, A280(1): 37-49.

[6] 张亮, 司乃潮, 王宏建, 等. 熔体处理对 A356 合金组织和性能的影响[J]. 铸造, 2017, 66(3): 294-297.

[7] 刘文娇, 张新朋, 李惠杰, 等. 固溶处理对 7A55 铝合金断裂韧性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2007, 38(1): 41-45.

[8] NIKLAS A, FERNANDEZ-CALVO A L, LACAZE J, et al. Thermal analysis as a microstructure prediction tool for A356 aluminium parts solidified under various cooling conditions[J]. China Foundry, 2011, 8(1): 89-95.