

固溶处理对 Yb 变质 ADC12 合金组织及耐磨性能的影响

熊俊杰^{1,3} 王云峰² 闫洪^{1,3} 刘智彬^{1,3}

(1.南昌大学机电工程学院; 2.高安市璐克斯机械有限公司; 3.南昌市轻合金制备与加工重点实验室)

摘要 采用高能超声熔铸的方法制备了 ADC12-0.9Yb 合金,研究了固溶处理对该合金组织及耐磨性能的影响。结果表明,当固溶温度为 520 ℃,固溶时间为 1 h 时,固溶效果较佳,其组织中的 Si 相在保证不粗化的同时实现了较大程度的球化。在载荷为 60 N,转速为 100 r/min,摩擦时间为 15 min 时,铸态 ADC12 合金的磨损机制主要是剥落磨损;铸态 ADC12-0.9Yb 合金的磨损机制主要是磨粒磨损,其次是塑性变形以及粘着磨损;固溶态(520 ℃×1 h)ADC12-0.9Yb 合金的磨损机制主要为磨粒磨损以及塑性变形。

关键词 ADC12-0.9Yb 合金;固溶处理;组织;磨损机制

中图分类号 TG166.3;TB331

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.04.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Solution Treatment on Microstructure and Wear Resistance of ADC12 Alloy Modified by Yb

Xiong Junjie^{1,3}, Wang Yunfeng², Yan Hong^{1,3}, Liu Zhibin^{1,3}

[1.School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanchang University; 2.Luxe Machinery (Gao'an) Co., Ltd.; 3.Key Laboratory of Light Alloy Preparation Processing in Nanchang City]

Abstract: ADC12-0.9Yb alloy was fabricated by high-energy ultrasonic casting, and the effects of solution treatment on the microstructure and wear resistance of the alloy were investigated. The results indicate that the solution effect of ADC12-0.9Yb alloy is desirable with the solution at 520 ℃ for 1 h, and the silicon phase is spheroidized to a greater extent without coarsening. Under the conditions of the load of 60 N, the speed of 100 r/min, and the friction time of 15 min, the wear mechanism of the as-cast ADC12 alloy is dominated by spalling wear, and that of the as-cast ADC12-0.9Yb alloy is mainly abrasive wear, followed by plastic deformation and adhesive wear. The wear mechanism of ADC12-0.9Yb alloy by solution treatment (solid solution at 520 ℃ for 1 h) is dominated by abrasive wear, accompanied with plastic deformation.

Key Words: ADC12-0.9Yb Alloy, Solid Solution Treatment, Microstructure, Wear Mechanism

近年来,新能源汽车飞速发展,为了实现轻量化,汽车车身以及零部件、底盘等基本采用铝合金制造。为了提升新能源汽车的整体品质,对铝合金的力学性能以及耐磨性能提出了更高的要求。ADC12 铝合金具有良好的铸造性能、无热裂以及缩松倾向低、气密性较高、导电性好等特点,可以在恶劣的腐蚀环境下使用,在航空发动机、汽车零部件、摩托车、飞机零部件以及结构件等方面得到广泛应用^[1~3]。然而,由于其显微组织中存在许多粗大的二次相,严重影响其力学性能和耐磨性能^[4,5]。

研究表明,在 Al-Si 合金中添加质量分数为 0.6%~1.2% 的稀土可以很好地改善其显微组织,包括改善二

次相的尺寸和形貌、细化晶粒、减少孔隙率等^[6~8]。稀土在 Al-Si 合金中主要起变质、净化、合金化等作用^[9,10]。RAO Y S 等^[11]发现,在 ADC12 合金中添加 1.0%~1.5% 的稀土 Sm 能够很好地细化其共晶 Si 相,改善共晶 Si 相的形状。此外,1.0% 的 Sm 对 β -Fe 相也有一定的改善作用。但是,稀土 Sm 几乎不能将针状 β -Fe 相转变为汉字状或骨骼状的 α -Fe 相。李厅等^[12]向 ADC12 合金中添加稀土 La、Ce 后,发现组织的晶粒更加细小且均匀,二次枝晶臂间距也有所减少,共晶 Si 转变成短棒状。同时,试样的显微硬度、抗拉强度都明显提高,尤其是断口上的韧窝明显增多。因此,在 ADC12 合金中添加稀土对其组织和力学性能均能起到

收稿日期:2021-07-05;修改稿收到日期:2021-09-24

基金项目:江西省自然科学基金资助项目(20181BAB206026)

第一作者简介:熊俊杰,男,1988 年出生,博士研究生,南昌(330031),E-mail: xiongjjdwyyx588@163.com

通信作者:王云峰,男,1986 年出生,工程师,江西高安(330800),E-mail: jjxxwyyff@163.com

引用格式:熊俊杰,王云峰,闫洪,等. 固溶处理对 Yb 变质 ADC12 合金组织及耐磨性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(4): 409-414.

XIONG J J, WANG Y F, YAN H, et al. Effects of solution treatment on microstructure and wear resistance of ADC12 alloy modified by Yb [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(4): 409-414.

一定的改善作用。此外,也有研究表明,对 Al-Si 合金进行热处理,也能有效地提高 Al-Si 合金的组织及耐磨性能^[13~15]。对 Al-Si 合金中粗大长针状的 Si 相在 T6 热处理过程中的转变,普遍认为是在固溶阶段,时效阶段对 Si 相几乎没有影响。在固溶处理期间, Si 相的转变分为粗大长针状的 Si 相破碎、破碎后的块状或颗粒状的 Si 相进行球化、Si 相的球化和粗化 3 个阶段^[16]。尽管对于 Al-Si 合金中 Si 相的转变过程研究很多,然而,有关向 Al-Si 合金中添加稀土后的热处理的研究报道较少。向 Al-Si 合金中添加稀土后, Si 相以及固溶相均会发生不同程度的变化,导致热处理期间 Si 相以及固溶相的转变过程也会发生不同程度的变化,这些均会影响到整个热处理工艺的取值变化,因此,研究添加稀土之后的 Al-Si 合金的热处理过程具有积极的意义。

本课题研究了质量分数为 0.9% 的 Yb 对 ADC12 合金组织的影响,观察了不同固溶处理工艺条件下 ADC12-0.9Yb 合金组织中相的变化,同时对铸态 ADC12 和 ADC12-0.9Yb 合金、固溶态 ADC12-0.9Yb 合金在相同磨损条件下的磨损机理进行了探讨,旨在为其应用提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

制备 ADC12-0.9Yb 合金所用基体为 ADC12 铝合金,其化学成分见表 1。向 ADC12 合金中添加 Al-10Yb 中间合金,最大限度地减少 Yb 的烧损, Al-10Yb 中间合金相比稀土 Yb,变质效果会更好^[17]。图 1 为

表 1 ADC12 合金主要的化学成分

Tab.1 Main chemical composition of ADC12

aluminum alloy						%
w_B						
Si	Cu	Mg	Zn	Fe	Mn	Al
9.6~12.0	1.5~3.5	≤ 0.3	≤ 1.0	≤ 0.9	≤ 0.5	余量

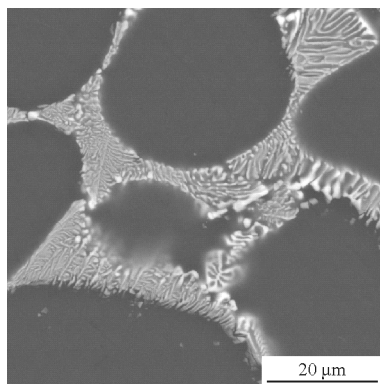


图 1 Al-10Yb 中间合金的显微组织

Fig.1 Microstructure of Al-10Yb master alloy

Al-10Yb 中间合金的显微组织。

1.2 制备方法

将所有需要用到的试验器具,如石墨坩埚以及模具及其他操作工具等进行干燥处理。将特定质量的碎化的 ADC12 合金放置在石墨坩埚中,并在电阻炉中加热至 750 °C 左右,等合金完全熔化后,将配置好的、用铝箔纸分开包装的 Al-10Yb 中间合金依次加入其中,并用金属棒进行搅拌,搅拌尽量快速平稳,随后添加 0.9% 的 Yb,静置 25 min 后立即进行超声处理 5 min,随后去除铝液表层氧化膜以及表面杂质,然后快速将铝液浇入已经预热好的模具中,待冷却凝固后,取出试样,制得 ADC12-0.9Yb 合金。作为比较,基体合金也在相同的条件下制备。

1.3 固溶处理

将 ADC12-0.9Yb 合金置于 SX-10-13 型箱式电阻炉中进行固溶处理,在 490、505、520、540 °C 下保温 1 h 和在 520 °C 下分别保温 0、0.5、1、2、3、4 h 固溶后快速置入 60 °C 的水中进行淬火。

1.4 耐磨性能测试

将试样制备成 $\phi 4.5 \text{ mm} \times 11 \text{ mm}$ 的摩擦棒,用砂纸打磨、抛光,后采用超声酒精清洗处理。利用 M-2000 型摩擦磨损试验机对 ADC12、ADC12-0.9Yb,经 520 °C $\times 1 \text{ h}$ 固溶处理的 ADC12-0.9Yb 铝合金进行磨损测试,载荷为 60 N,转速为 100 r/min,滑动时间为 15 min。

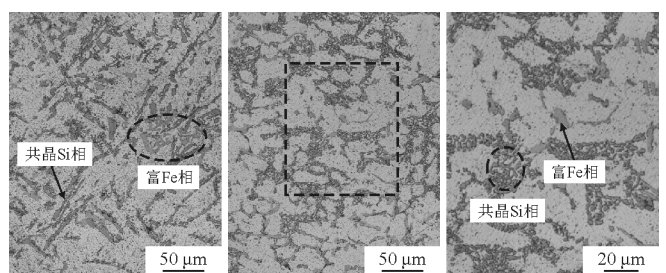
1.5 分析测试方法

取试样的同一位置进行镶嵌,将镶嵌试样依次用 100~600 号的水磨砂纸粗磨,随后用 1000~2000 号的水磨砂纸细磨,最后进行抛光。腐蚀液采用体积分数为 0.5% 的 HF 溶液,腐蚀 3~5 s 后用蒸馏水清洗,然后用吹风机吹干。采用 MA200 型光学显微镜进行观察。采用扫描电镜 (SEM, FEI Quanta 200F) 和能谱仪 (EDS, JSM-6701F) 对合金进行显微组织和能谱分析。

2 试验结果分析与讨论

2.1 铸态组织

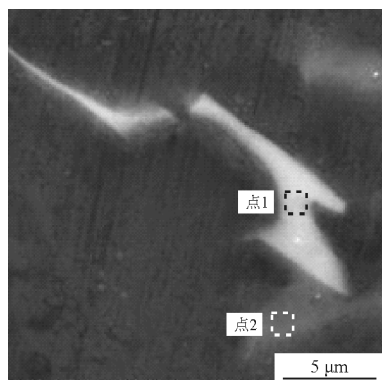
图 2 为铸态 ADC12 和 ADC12-0.9Yb 合金的显微组织。从图 2a 可看出,基体中主要存在着粗大的 α -Al 相、长条状的共晶 Si 相和粗大块状或条状的富 Fe 相。添加 0.9% 的 Yb 后,组织中的 α -Al 相轮廓变得更清晰,晶粒变小,二次相也得到了较大程度的细化,见图 2b。从图 2c 中可以更清晰地观察到共晶 Si 相变为颗



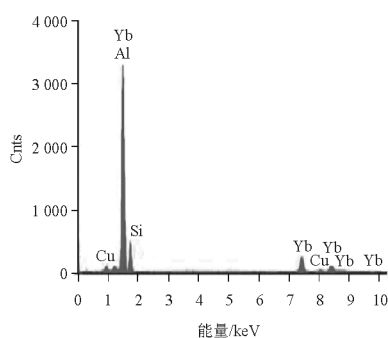
(a) ADC12 (b) ADC12-0.9Yb (c) 图 2b 方框处局部放大

图 2 铸态 ADC12 合金及 ADC12-0.9Yb 合金的 OM 组织

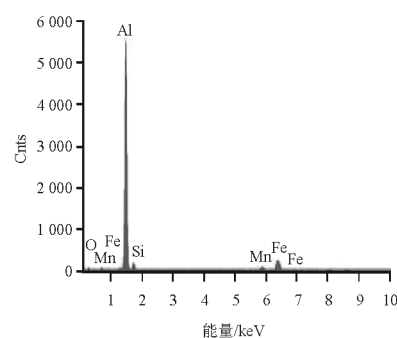
Fig.2 OM images of as-cast ADC12 and ADC12-0.9Yb alloy



(a) SEM



(b) 点 1 EDS



(c) 点 2 EDS

图 3 铸态 ADC12-0.9Yb 合金的 SEM 组织及能谱图

Fig.3 SEM images and EDS analysis of as-cast ADC12-0.9Yb alloy

2.2 固溶温度对 ADC12-0.9Yb 合金组织中 Si 相的影响

图 4 为 ADC12-0.9Yb 合金在不同固溶温度下 (490、505、520、540 °C) 固溶 1 h 的显微组织。可以看出,总体上随着固溶温度升高, Si 相球化效果越来越好,但是 Si 相的粗化也变得越来严重。这是因为在固溶时间一定的情况下,当温度逐渐升高时,长条状的共晶 Si 相能够吸收更多的能量逐渐变成短棒状或块状。当温度达到一定程度时,短棒状或块状的 Si 相吸收的能量足以使得 Si 相分开,棱角变钝,逐渐球化。当温度继续升高时, Si 相就会长大,并快速粗化。当固溶

粒状甚至细小纤维状,富 Fe 相也变成了短棒状或小块状。

图 3 为 ADC12-0.9Yb 的 SEM 形貌以及对应的 EDS 图。从图 3a 和图 3b 可知,亮白色的相为稀土相,由 Al、Si、Yb、Cu 等 4 种元素组成。结合图 3a 和图 3c 可知,暗色相为富 Fe 相,由 Al、Si、Fe、Mn 等元素组成。从图 3a 中可以看出,稀土 Yb 相与富 Fe 相紧紧相连,这表明稀土 Yb 相可能会对富 Fe 相的形核以及生长产生影响。

温度为 540 °C 时,固溶 1 h 后,组织中可以发现明显的融熔孔洞,见图 4d。因此,在 540 °C 固溶会造成 ADC12 合金产生过烧,这主要是由于低熔点相(富 Cu 相)的熔点一般为 500~510 °C 之间,540 °C 已经超过富 Cu 相的熔点,使其快速熔化造成的^[18]。综合考虑,在保证不发生严重过烧情况下,当固溶温度越高,共晶 Si 相球化效果越好,固溶相的固溶度越高,固溶效果也更好。此外,固溶温度高,其对应的最佳固溶时间也会越短,晶粒粗化也会得到一定程度的减弱,对 ADC12 铝合金的伸长率因晶粒粗化造成的负面影响也会减弱,因此最佳固溶

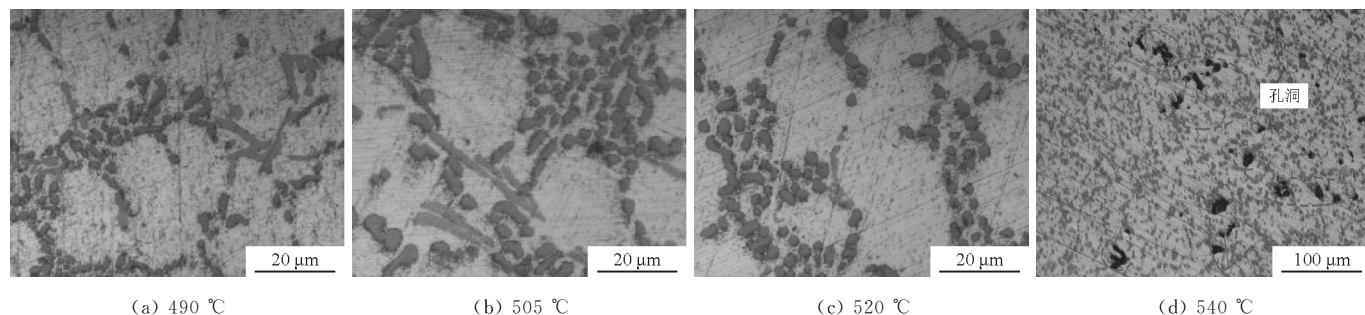


图 4 ADC12-0.9Yb 合金在不同温度固溶 1 h 的显微组织

Fig.4 Microstructure of ADC12-0.9Yb alloy at various solid solution temperatures for 1 h

温度为 520 °C。

2.3 固溶时间对 ADC12-0.9Yb 合金组织中 Si 相的影响

图 5 为在 520 °C 下,不同固溶时间(0、0.5、1、2、3、4

h) 的 ADC12-0.9Yb 合金组织中 Si 相形貌。可以看出,随着固溶时间延长, Si 相的球化程度越来越高,但是 Si 相的平均尺寸也逐渐增大。当向 ADC12 合金中加入

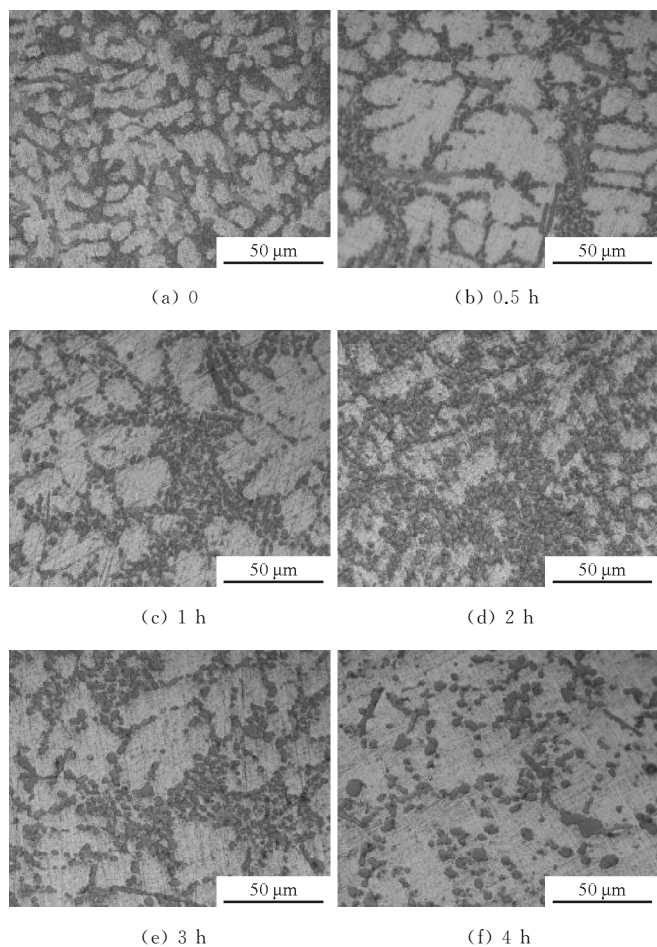


图 5 ADC12-0.9Yb 合金在不同固溶时间下的显微组织

Fig.5 Microstructure of ADC12-0.9Yb alloy for various solid solution duration

Yb 后,在极短的时间内,少量尺寸稍大的纤维状的 Si 相能迅速破碎并进入球化阶段,大部分尺寸较小的纤维状的 Si 相不需要破碎就直接球化。因此,添加 0.9% 的 Yb 的合金经过 0.5 h 的固溶处理后,很难发现共晶 Si 相破碎,而只观察到共晶 Si 相球化(见图 5b),组织中仍可以发现少量短棒状的 Si 相。因此, Si 相的球化程度在 0.5 h 时并未达到最高。从图 5c 可以发现,经过 1 h 固溶后,大部分 Si 相已经完全转变为球状且平均尺寸稍有增加。然而,从图 5c~图 5f 中可以发现,固溶时间从 1~4 h 的过程中, Si 相的球化程度差距不大而其长大速度却越来越快。因此,可以认为经过 1 h 的固溶处理后, Si 相的球化程度已经基本接近最大化。因此综合考虑,在 520 °C 下, Si 相的最佳固溶时间为 1 h。

2.4 固溶处理对组织中稀土相及富 Fe 相的影响

图 6 为在 520 °C 固溶 4 h 后 ADC12-0.9Yb 合金的显微组织及面扫描分布。可以看出,大部分富 Fe 相比较完整,并未发生明显熔断或破碎的现象。少量稀土相能够发生轻微的破碎现象,聚集的富 Yb 稀土相呈现出不连续的分布,但从图 6a 中可以发现大部分稀土相依然保持完整,这其中的原因可能是部分 Yb 原子通过空位、位错以及晶界移动到基体的其他位置,从而导致稀土相发生破碎。因此,固溶处理对富 Fe 相和稀土相产生的影响均较小。这可能是由于稀土相与富 Fe 相一样熔点很高, Fe 原子、稀土 Yb 原子与周围其他原子的结合能力很强,破坏它们之间的结合力需要很高的能

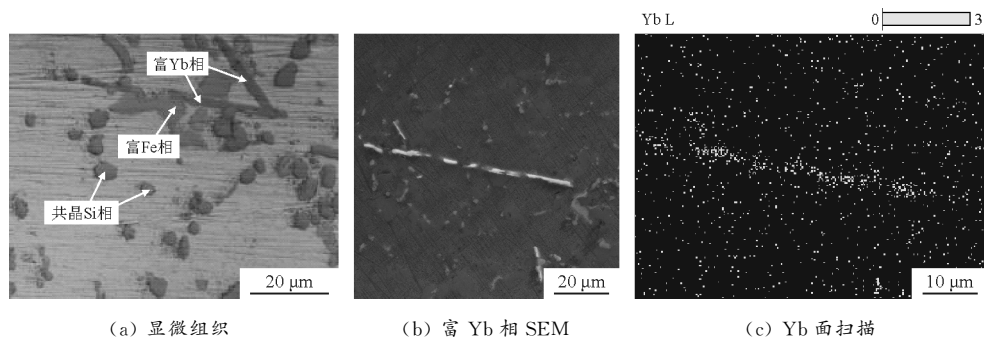


图 6 在 520 °C 下固溶处理 4 h 后的 ADC12-0.9Yb 合金的显微组织

Fig.6 Microstructure of ADC12-0.9Yb alloy after solid solution at 520 °C for 4 h

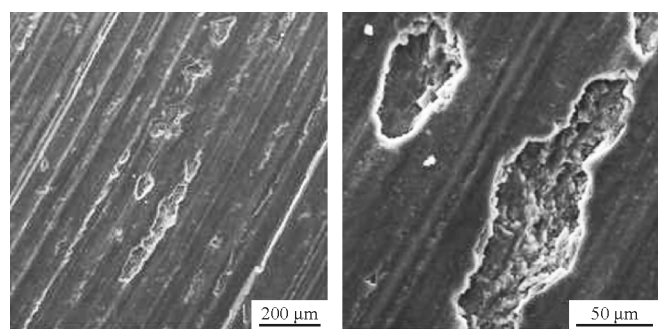
量。此外, Fe 原子、稀土 Yb 原子与 Al 原子尺寸差距较大,原子在 α -Al 内部移动速度较慢,这也是导致它们很难溶入基体的重要原因。

2.5 磨损机理分析

图 7 是在载荷为 60 N、转速为 100 r/min、摩擦时间为 15 min 的条件下,铸态 ADC12、铸态 ADC12-0.9Yb、固溶态 ADC12-0.9Yb 合金磨面的扫描电镜 (SEM) 图。可以发现,经过摩擦磨损试验后, ADC12 磨面上存在非常严重的剥落坑,以及许多细小的划痕。这

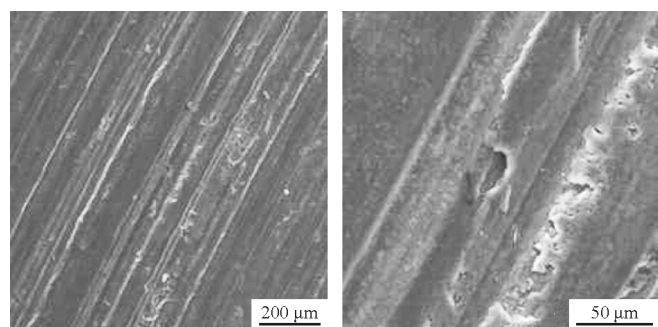
是由于铸态合金组织中存在着粗大的二次相,特别是有一些尖角形貌的共晶 Si 相,这些相容易割裂基体,成为裂纹扩展的根源,在摩擦时容易脱落形成较大的凹坑,因此,在 60 N 的载荷下, ADC12 合金的主要磨损机制是剥落磨损。从图 7c 和图 7d 中可以发现,经过磨损试验后,添加 0.9% Yb 的 ADC12 合金的磨面上存在细小的划痕、少量的塑性变形以及因表面受力挤压形成的薄的层片状剥落坑。因此,添加 0.9% 的 Yb 的 ADC12 合金的主要磨损机制是磨粒磨损,其次是塑性变形以及粘

着磨损。相比 ADC12 基体合金而言,其磨损情况明显变好。这是由于添加稀土后,合金组织中的二次相得到了一定程度的细化,长条状的共晶 Si 相变成了细小短棒状或细小颗粒状,裂纹不易扩展,在摩擦时也不易形成凹坑脱落。因此,稀土 Yb 能够大幅改善基体 ADC12 合金的耐磨性能。从图 7e 和图 7f 中可以发现,经固溶处理后,磨面上有少量细小的划痕以及轻微的塑性变形,其主要的磨损机制为轻微的磨粒磨损以及轻微的塑性变形,与 ADC12 合金相比,耐磨性能得到较大程度的提高。这是由于 ADC12-0.9Yb 合金经过热处理后,其组织中的二次相得到了较大程度的细化,特别是共晶 Si 相变得球形圆整,其分布也变得更为均匀,这对该合金耐磨性的提高起到了关键作用。



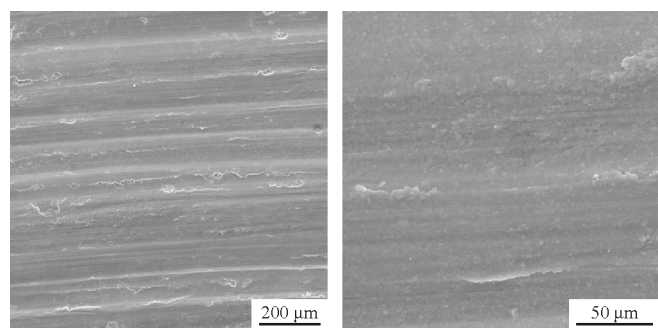
(a) ADC12 合金,铸态低倍

(b) ADC12 合金,铸态高倍



(c) ADC12-0.9Yb 合金,铸态低倍

(d) ADC12-0.9Yb 合金,铸态高倍



(e) ADC12-0.9Yb 合金,固溶态低倍 (f) ADC12-0.9Yb 合金,固溶态高倍

图 7 不同工艺条件下的 ADC12-xYb 合金在 60 N 下磨面的 SEM 图

Fig.7 SEM images of ADC12-xYb alloy at 60 N loading under different processes

3 结 论

(1)添加 0.9% 的 Yb 后,ADC12 合金晶粒变小,其组织中生成了由 Al、Si、Yb、Cu 等 4 种元素组成的稀土相,共晶 Si 相和富 Fe 相均得到了一定程度的细化。

(2)经 520 °C × 1 h 固溶后,ADC12-0.9Yb 合金的固溶效果较佳,其组织中的 Si 相在保证不粗化的同时得到了较大程度的球化,固溶处理对富 Fe 相和稀土相产生的影响均较小。

(3)在载荷为 60 N,转速为 100 r/min,摩擦时间为 15 min 的条件下,铸态 ADC12 合金的磨损机制主要是剥落磨损,铸态 ADC12-0.9Yb 合金的磨损机制主要是磨粒磨损,其次是塑性变形以及粘着磨损,固溶态(在 520 °C 固溶 1h)ADC12-0.9Yb 合金的磨损机制主要为轻微的磨粒磨损以及轻微的塑性变形。

参 考 文 献

- [1] LORELLA C, LURI B, ALESSANDRO M, et al. Microstructure, tensile and fatigue properties of the Al-10Si-2Cu alloy with different Fe and Mn content cast under controlled conditions[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209: 5 669-5 679.
- [2] 唐全波, 姜巨福, 王迎. ADC12 铝合金连杆挤压铸造[J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30(7): 636-638.
- [3] OKAYASU M, OHKURA Y, TAKEUCHI S, et al. A study of the mechanical properties of an Al-Si-Cu alloy (ADC12) produced by various casting processes[J]. Materials Science and Engineering, 2012, A543: 185-192.
- [4] 徐小科, 彭晓东, 谢卫东, 等. 铸造铝合金的强化研究[J]. 材料导报, 2008(22): 409-411.
- [5] 胡志强, 罗继相, 黄毅. 挤压铸造 ADC12 铝合金端盖裂纹的产生及防止措施[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(6): 776-778.
- [6] HU Z, YAN H, RAO Y S. Effects of samarium addition on microstructure and mechanical properties of as-cast Al-Si-Cu alloy[J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2013, 23(11): 3 228-3 234.
- [7] MAO F, YANG G Y, XUAN Z J, et al. Effect of Eu addition on the microstructures and mechanical properties of A356 aluminum alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 650: 896-906.
- [8] WAN B B, CHEN W P, LIU L S, et al. Effect of trace yttrium addition on the microstructure and tensile properties of recycled Al-7Si-0.3Mg-1.0Fe casting alloys[J]. Materials Science & Engineering, 2016, A666: 165-175.
- [9] 解佩佩, 史攀, 李方峰, 等. 稀土 Ce 变质铸造 Al-12.35Si 合金的组织及性能[J]. 铸造技术, 2021, 42(6): 475-481.
- [10] 胥锴, 刘政, 刘萍. 稀土在铝及铝合金中的应用现状与展望[J]. 有色金属加工, 2005, 34(5): 10-14.
- [11] RAO Y S, YAN H, HU Z. Modification of eutectic silicon and β -Al₅FeSi phases in as-cast ADC12 alloys by using samarium addition[J]. Journal of Rare Earths, 2013, 31 (9): 917-922.
- [12] 李厅, 余忠蚰, 章凯钊, 等. 混合稀土钕铈对再生铝合金 ADC12 的影响[J]. 有色金属工程, 2017, 7(2): 26-29.

原位内生树枝晶增韧钛基非晶复合材料的组织与性能

吕敬旺¹ 韦超² 马小昭^{1,3} 张山¹ 施志林¹ 张浩然¹ 马明臻¹

(1.燕山大学亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室; 2.燕山大学理学院; 3.北京工业大学材料与制造学部)

摘要 以 $(\text{Ti}_{40.4}\text{Zr}_{27.7}\text{Be}_{15.6}\text{Cu}_{6.3})_{(90+x)/90}\text{Nb}_{10-x}$ ($x=0, 2, 4, 6, 8, 10, \%$)合金体系为研究对象,制备了4种成分的原位内生 β 相树枝晶增强钛基非晶复合材料。用XRD、SEM和TEM等手段分析了钛基非晶复合材料的相组成、微观结构以及力学性能和变形行为。结果表明,钛基非晶合金复合材料中的原位内生 β 相树枝晶的体积分数与尺寸均随Nb含量的增加而增大。拉伸测试结果表明,其屈服强度和抗拉强度随着原位内生 β 相树枝晶尺寸的增大而降低,但塑性变形能力显著提高。其中, $\text{Ti}_{40.4}\text{Zr}_{27.7}\text{Be}_{15.6}\text{Cu}_{6.3}\text{Nb}_{10}$ 非晶复合材料的屈服强度为1 307 MPa,抗拉强度为1 428 MPa,断裂应变为9.61%,表明了钛基非晶复合材料的良好塑性变形能力。

关键词 钛基非晶合金复合材料;原位自生;组织结构;力学性能;变形行为

中图分类号 TG139.8;TB331

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.04.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Microstructure and Properties of Ti-based BMGC Reinforced by In-situ Endogenetic Dendrite

Lü Jingwang¹, Wei Chao², Ma Xiaozhao^{1,3}, Zhang Shan¹, Shi Zhilin¹, Zhang Haoran¹, Ma Mingzhen¹

(1.State Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology, Yanshan University; 2.College of Science, Yanshan University; 3.College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology)

Abstract: Taking $(\text{Ti}_{40.4}\text{Zr}_{27.7}\text{Be}_{15.6}\text{Cu}_{6.3})_{(90+x)/90}\text{Nb}_{10-x}$ ($x=0, 2, 4, 6, 8, 10, \%$) alloy as the research object, four kinds of Ti-based bulk metallic glass composites (BMGCs) reinforced by in-situ endogenetic β -phase dendrites were prepared. The phase composition, microstructure, mechanical properties and deformation behavior of Ti-based BMGCs were systematically analyzed through XRD, SEM and TEM. The results demonstrate that the volume fraction and dimension of the in-situ endogenetic β -phase dendrites in Ti-based BMGCs are increased with the increase of Nb content. The tensile results reveal that the yield strength and tensile strength of the composites are decreased with increasing dimension of the in-situ endogenetic β -phase dendrites, contrarily, the plastic deformation ability is enhanced significantly. Among these BMGCs, the mean yield strength, tensile strength and fracture strain of $\text{Ti}_{40.4}\text{Zr}_{27.7}\text{Be}_{15.6}\text{Cu}_{6.3}\text{Nb}_{10}$ BMGC are 1 307 MPa, 1 428 MPa and 9.61%, respectively, indicating the excellent plastic deformation ability of the Ti-based BMGC.

Key Words: Ti-based BMGC, In-situ Endogenetic, Microstructure, Mechanical Properties, Deformation Behavior

收稿日期:2021-07-15;修改稿收到日期:2021-10-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52071278,51827801);国家重点研发计划资助项目(2018YFA0703603)

第一作者简介:吕敬旺,男,1993年出生,博士研究生,河北秦皇岛(066004),E-mail:1473359882@qq.com

通信作者:马明臻,男,1955年出生,教授,河北秦皇岛(066004),E-mail:mz550509@ysu.edu.cn

引用格式:吕敬旺,韦超,马小昭,等.原位内生树枝晶增韧钛基非晶复合材料的组织与性能[J].特种铸造及有色合金,2022,42(4):414-418.

LÜ J W, WEI C, MA X Z, et al. Microstructure and properties of Ti-based BMGC reinforced by in-situ endogenetic dendrite[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(4):414-418.

[13] 李润霞,李荣德,吕伟,等.固溶处理对铸造Al-Si-Cu-Mg合金组织与性能的影响[J].中国有色金属学报,2007,17(2):193-199.

[14] 王慧芳,龙思远,吴星宇,等.铁镁含量及热处理对压铸铝硅合金组织和拉伸性能的影响[J].机械工程材料,2016,40(2):21-25.

[15] 许长林,方建儒,杨亚峰,等.变质及热处理对过共晶铝硅合金组织与滑动摩擦性能的影响[J].金属加工(热加工),2009(15):23-25.

[16] GARCIA G G, ESPINOZA C J, MANCHA M H. Copper content and cooling rate effects over second phase articles behavior in in-

dustrial aluminum-silicon alloy 319[J]. Materials and Design, 2007, 28: 428-433.

[17] 陈建春.铝合金变质、细化、合金化材料及铝熔体物理净化材料的设计、工艺及应用研究[D].武汉:武汉大学,2011.

[18] BACAICOA I, DWIVEDI P K, LUETJE M M, et al. Effect of non-equilibrium heat treatments on microstructure and tensile properties of an Al-Si-Cu alloy[J]. Materials Science & Engineering, 2016, A673: 562-571.

(编辑:栗万仲)