

Ag 对精密铸造 Be-Al 合金组织的强化作用

黄旭刚 刘兆刚 张健康 李军义 李春生

(西北稀有金属材料研究院宁夏有限公司稀有金属特种材料国家重点实验室)

摘 要 采用添加微量元素 Ag 的方式强化精密铸造高铍 Be-Al 合金的铸造性能。通过研究高 Be 铸造 Be-Al 合金的制备、腐蚀方法和 SEM、EDS 分析,从微观层面分析 Ag 在 Be-Al 合金中的分布与强化组织。开发出能够显示 Ag 强化组织的腐蚀方法,发现在高 Be 铸造 Be-Al 合金中,Ag 在 Be-Al 界面和 Al 相中,局部富集形成了强化组织。

关键词 精密铸造;高 Be-Al 合金;银;强化组织

中图分类号 TG249.5;TG146.24 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.01.027

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Strengthening Effects of Silver on High Beryllium Aluminum by Investment Casting

Huang Xugang, Liu Zhaogang, Zhang Jiankang, Li Junyi, Li Chunsheng

(State Key Laboratory of Special Rare Metal Material, Northwest Rare Metal Materials Institute)

Abstract: The casting properties of high beryllium Be-Al alloy by investment casting were strengthened by adding trace element Ag. The distribution and strengthening structure of Ag in Be-Al alloy were analyzed from microscopic level by investigating the preparation and corrosion method as well as SEM and EDS analysis. A corrosion method was developed to display the enhanced microstructure of Ag. The results indicate that Ag is locally enriched at the Be-Al interface and in the Al phase in high beryllium cast beryllium aluminum.

Key Words: Investment Casting, High Beryllium-aluminum Alloy, Silver, Strengthening Structure

铸造 Be-Al 合金力学性能优异,具有低密度、高比强度、热稳定性好等特点,在航空、航天及军事领域得到重视。近年来,随着技术发展,铸造 Be-Al 合金的应用越来越广泛,对其性能的要求也越来越高^[1~5]。在 Be-Al 合金中加入微量元素可以强化合金的韧性、强度、流动性^[2],也可添加微量元素制备洛克合金(Al-Be)^[2,3]。

收稿日期:2022-01-23;**修改稿收到日期:**2022-03-19
基金项目:中央引导地方科技发展专项基金资助项目(2020);中国有色集团科技计划资助项目(2018KJJH05);宁夏回族自治区产业创新揭榜资助项目(20200108)
第一作者简介:黄旭刚,男,1979 年出生,工程师,宁夏石嘴山(753000),E-mail:huangxg2050@163.com
引用格式:黄旭刚,刘兆刚,张健康,等. Ag 对精密铸造 Be-Al 合金组织的强化作用[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(1):126-128.
HUANG X G, LIU Z G, ZHANG J K, et al. Strengthening effects of silver on high beryllium aluminum by investment casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(1):126-128.

[3] 董帅, 赵忠兴, 符和锋, 等. 涡轮增压器叶轮低压铸造工艺设计及优化[J]. 沈阳理工大学学报, 2014, 33(3): 55-58.

[4] LIU S G, CAO F Y, ZHAO X Y, et al. Characteristics of mold filling and entrainment of oxide film in low pressure casting of A356 alloy[J]. Mater. Sci. Eng., 2015, A626: 159-164.

[5] LUO A A. Magnesium casting technology for structural applications [J]. J. Mag. Aly., 2013(1): 2-22.

[6] SRINIVASANA, PILLAIU T S, SWAMINATHANJ, et al. Enhanced high temperature properties of low pressure cast AZ91 Mg alloy[J]. Inter. J. Cast Met. Res., 2006, 19:265-268.

[7] 徐岳. 基于 CAD/CAE/CAM 技术的砂型铸造工艺研发[D]. 石家庄: 河北工程大学, 2014.

[8] CHOUDHARI C M, NARKHEDE B E, MAHAJAN S K. Casting design and simulation of cover plate using Auto CAST-X software for defect minimization with experimental validation[J]. Procedia Materials Science, 2014(6): 786-797.

[9] 李云帅, 朱小倩, 林文华, 等. 基于 ProCAST 的汽车轮毂铸造模拟[J]. 铸造, 2020, 69(5): 547-551.

[10] KERMANPUR A, MAHMOUDI S H, HAJIPOUR A. Numerical simulation of metal flow and solidification in the multi-cavity casting moulds of automotive components[J]. J. Mater. Proc. Tech., 2008, 206: 62-68.

[11] SHIVA R, MOHAMMAD M, HAMZE E. Three-dimensional simulation of flow over sharp-crested weirs using volume of fluid method [J]. Journal of Applied Engineering Sciences, 2020, 10(1): 75-82.

[12] 于斐, 蒋玲玲. 基于 VERICUT 的整体叶轮五轴联动数控加工仿真[J]. 机械设计与制造, 2010(7): 159-160.

[13] HB963-2005. 铝合金铸件规范[S].

[14] 张清, 陈玉平. 铝合金石膏型低压铸造工艺规程的研究与应用[J]. 热加工工艺, 2007, 36(17): 27-29.

[15] 田磊. 水龙头本体低压铸造数值模拟与工艺优化[D]. 福建厦门: 集美大学, 2012.

(编辑:张正贺)

采用 Ag 可以强化铸造 Be-Al 合金中 Be、Al 两相的界面结合力,增加 Be-Al 合金的延展性和强度^[4]。由于 Be-Al 应用领域的敏感性,公开报道很少,国内对铸造 Be-Al 合金的研究多集中在成形工艺和添加元素类型与机理,对添加元素形成的强化组织研究报道则较少。

根据 Be-Al 二元合金相图,Be、Al 之间不形成任何金属间化合物^[4]。在很宽的温度范围内,Be、Al 相互固溶度极低,两相始终处于分离状态,连续分布两相呈显著糊状凝固特征,形成 Be 相和 Al 相互相穿透的三维网络状特殊结构^[5~7]。Ag 在铸造 Be-Al 合金中的 Al 相中形成一种沉淀强化相来强化合金,但不会影响到其显微组织^[8],也未发现除 Be 相、Al 相外的第 3 种相^[9]。添加 Ag 能够改善铸造 Be-Al 合金中 Be、Al 两相的界面结合力,增加其延展性和强度,但生产实践中实现和生产工艺的针对性改进有一定难度。因此,本课题进行了研究,以期对生产实践提供参考。

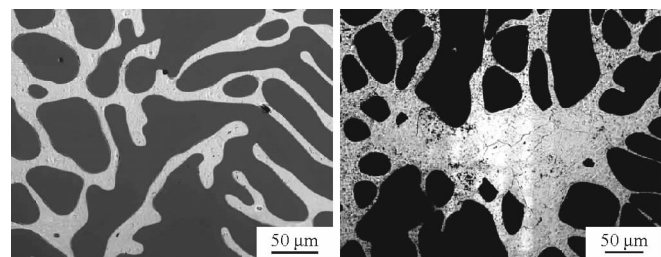
1 试样的选择与制备

选择纯 Be 珠(99.9%,质量分数,下同)、高纯 Al 粉(99.9%)为主要原料,添加微量 Ag 元素,采用真空熔炼、精密铸造 Be-Al 合金试样,其中含 32% 的 Al,≤2.5% 的 Ag,≤0.6% 的 Co,≤0.5% 的 Ge,余量为 Be。用 320 号、800 号金相砂纸依次打磨,9 μm、1 μm 抛光液依次机械抛光的方法制备试样,使用腐蚀剂(H₂SO₄、HNO₃、HCl 体积比为 1.2:1:1,每 100 mL 添加 4 滴 HF)^[10]对试样进行腐蚀,再用清水冲洗后超声清洗。用 Observer.A1m 金相显微镜进行金相组织观察,再使用 SUPRA55 扫描电镜和 Oxford X-MAX 能谱仪观察试样表面形貌和 EDS 分析。

2 Ag 在铸造 Be-Al 合金中的强化组织

2.1 金相观察

图1为腐蚀前、后铸造 Be-Al 合金的显微组织。腐



(a) 未腐蚀

(b) 腐蚀后

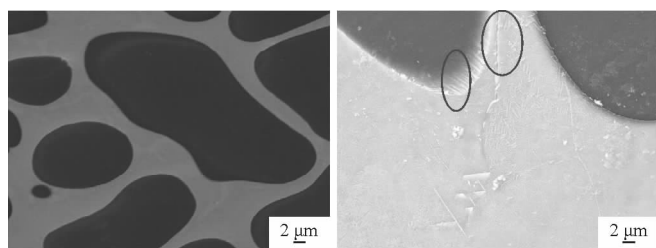
图 1 腐蚀前后铸造 Be-Al 合金的金相组织

Fig.1 Microstructure of cast Be-Al alloy before and after corrosion

蚀前,可以观察到界限分明的黑色 Be 相和白色 Al 相,见图 1a;腐蚀后,在 Al 相中观察到明显完整的 Al 晶粒,见图 1b。

2.2 SEM 观察

图 2 和图 3 为铸造 Be-Al 合金试样组织及腐蚀后试样 SEM 形貌。可以看出,组织中只有 Be 相和 Al 相。从图 2b 看到,Al 相中存在 Al 晶粒,在晶界处有针状组织,在 Be、Al 界面的部分区域,同样存在针状组织(见图 2b 圆圈处)。还发现 Al 晶粒的内部存在点状突起(见图 3a 圆圈处)。

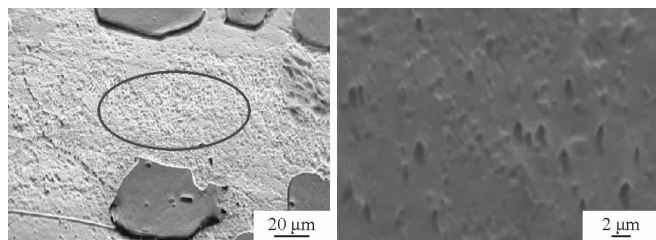


(a) 未腐蚀

(b) 腐蚀后

图 2 铸造 Be-Al 合金组织形貌

Fig.2 SEM images of cast Be-Al alloy before and after corrosion



(a) 腐蚀试样低倍

(b) 圆圈处腐蚀试样高倍

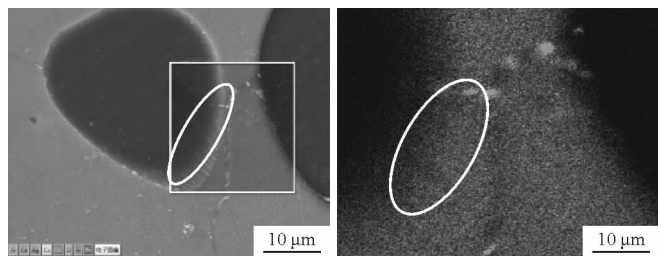
图 3 铸造 Be-Al 合金腐蚀后的 SEM 形貌

Fig.3 SEM images of cast Be-Al alloy after corrosion

根据 SEM 观察结果可以确定,铸造 Be-Al 合金中存在 Al 晶粒,在 Al 晶粒的晶界处存在针状组织,在 Al 晶粒的内部存在点状组织。另外,在 Be-Al 界面的部分区域,也同样存在针状组织。

2.3 EDS 能谱分析

图 4 为 Be-Al 合金的 EDS 分析结果。可以看出,Ag 基本均匀分布在 Al 相中,在 Be 相中无分布;Ag 在 Be-Al 界面处(见图 4 中圆圈处)有明显富集,且与 Be-Al 界面的针状组织存在对应关系。可以判断,Ag 在部分 Be-Al 界面处的富集形成了针状组织。这是 Ag 与第一近邻的 Be 原子形成了反键,使 Be-Al 合金中共价键减少、金属键增加,使得跨界面方向电荷密度增加、系统形成能降低,从而改善 Be、Al 界面浸润性^[10,11]。这说明,Ag 在铸造 Be-Al 合金的 Be、Al 界面处富集,形成针状强化组织,改善了 Be、Al 界面结合力,降低了铸造 Be-Al 合金的脆性。

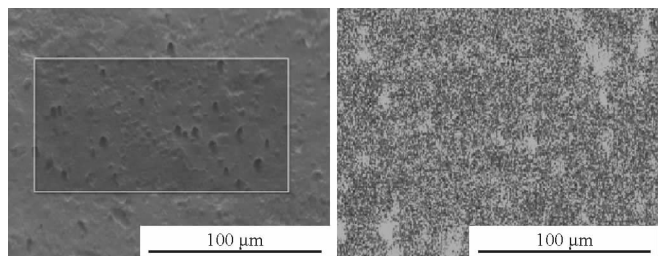


(a) 针状组织 (b) 方框处 Ag 元素分布

图 4 铸造 Be-Al 合金中针状组织的 EDS 分析

Fig.4 EDS analysis of acicular structure in cast beryllium aluminum alloy

继续对点状组织中的 Ag 分布进行分析,结果见图 4b 和图 5。可以看出,Ag 局部富集,分别为在 Al 晶粒的晶界和内部,且与点状组织对应。可以认为,Ag 在 Al 晶粒晶界和内部的富集,形成点状组织。Ag 相颗粒弥散分布在 Al 相中,发生沉淀强化,从而钉扎位错、阻碍位错运动,提高了铸造 Be-Al 合金的强度和延展性。这说明,在铸造 Be-Al 合金中 Ag 分布在 Al 晶粒晶界和晶粒内部,富集形成针状和点状强化组织,改善了铸造 Be-Al 合金的脆性、提高了合金强度和延展性。



(a) 点状组织 (b) Ag 元素分布

图 5 铸造 Be-Al 合金中点状组织的 EDS 分析

Fig.5 EDS analysis of punctate structure in cast beryllium aluminum alloy

3 结 论

(1)铸造 Be-Al 合金经适当腐蚀后出现 Ag 富集形成的强化组织。铸造 Be-Al 合金中 Be、Al 两相界限分明,而 Ag 富集在 Be、Al 界面处,Ag 与第一近邻的 Be 形成了反键,形成针状的强化组织,改善了 Be-Al 界面的结合性。

(2)冷却时铸造 Be-Al 合金中的 Al 相并非完全的糊状凝固,部分区域能够生长为 Al 晶粒,而 Ag 遵循沉淀强化机理,在 Al 晶粒内部和晶界析出形成强化组织,改善了铸造 Be-Al 合金的脆性,提高了其强度和延展性。

参 考 文 献

[1] 马玲,冯婷,焦旗,等.粉末冶金铍铝合金的铍铝界面结构[J].热加工工艺,2013,42(4):100-102.

[2] 王战宏,王莉,买学峰,等.铍铝合金结构材料制造研究[J].采矿技术,2006,6(4):16-18.

[3] 孙钟景,李军义,王东新,等.铍铝合金的制备工艺与应用进展[A].2015 年全国粉末冶金学术会议暨海峡两岸粉末冶金技术研讨会[C].武汉,2016.

[4] 马玲,赵双群.铍铝合金的研究进展[J].材料导报,2005(2):433-435.

[5] 张健康,栾新刚,王战宏,等.高铍铸造铍铝合金伸长率的评价指标[J].理化检验-物理分册,2016,52(3):375-378.

[6] CARTER D H. Age hardening in beryllium-aluminum-silver alloys [J]. Acta Mater., 1996, 44(11): 4 311-4 315.

[7] 马晓波,王东新,胡侨丹,等.元素添加强化铍铝合金研究现状[J].稀有金属,2021,45(8):1 010-1 017.

[8] 焦旗,马玲,冯婷,等.银、钴、锆对铍铝合金组织及性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2010,30(10):973-976.

[9] 张健康,浮国运,栾新刚,等.铍铝合金显微组织的评定方法[J].理化检验-物理分册,2015,51(3):320-323.

[10] 黄旭刚,张健康,李志年,等.一种铸造铍铝相组织平均截距的测量方法:中国,CN201911034737.4[P].2020-06-19.

[11] 徐海波,王锦程,杨根仓,等.Be-Al 合金中 Ag 和 Ni 合金化效应的第一性原理研究[J].铸造技术,2009,30(4):478-481.

(编辑:刘卫)

《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

