

压铸 Al-Zn-Si-Cu 合金的力学与导热性能

李正伟¹ 陈 明² 郝建飞¹ 陈 斌³ 于宝义¹ 李润霞³

(1.沈阳工业大学材料科学与工程学院; 2.东莞市青鸟金属材料有限公司; 3.东莞理工学院材料科学与工程学院)

摘 要 采用压铸工艺制备了 Al- x Zn-8Si-2Cu($x=12, 14, 16, 18, \%$)合金型材。使用 OM、SEM 分析 Zn 含量对合金微观组织形貌的影响,并进一步分析 Zn 含量对力学性能及导热性能的影响。结果表明,当合金中 Zn 含量从 12% 提升到 18% 时,固溶在 α -Al 基体中的 Zn 含量提高,对合金起到固溶强化作用,同时共晶 Si 尺寸增大形成尖角导致应力集中;合金的抗拉强度和屈服强度分别从 345.5 MPa、263.5 MPa 提高到 395.4 MPa、343.8 MPa;伸长率略微降低;热导率由 109.4 W/(m·K)降低到 85.7 W/(m·K)。

关键词 铝合金; Zn 元素; 导热性能; 力学性能; 显微组织

中图分类号 TG146.21; TG249.2

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.05.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Mechanical Properties and Thermal Conductivity of Casting Al-Zn-Si-Cu Alloys

Li Zhengwei¹, Chen Ming², Hao Jianfei¹, Chen Bin³, Yu Baoyi¹, Li Runxia³

(1.School of Material Science and Engineering, Shenyang University of Technology; 2.Dongguan Qingniao

Metal Material Co., Ltd.; 3.School of Materials Science and Engineering, Dongguan Institute of Technology)

Abstract: Al- x Zn-8Si-2Cu($x=12, 14, 16, 18, \%$) alloy profiles were fabricated by die casting. The effects of different Zn contents on the microstructure morphology of the alloy were analyzed by OM and SEM, and the influence of Zn content on mechanical properties and thermal conductivity were further analyzed. The results indicate that when the Zn content of alloy is increased from 12% to 18%, the Zn solid solution in α -Al matrix is increased, playing a role of solid solution strengthening. Meanwhile, the dimension of eutectic Si phase is increased to form a sharp angle, resulting in stress concentration. The tensile strength and yield strength of the alloy are increased from 345.5 MPa and 263.5 MPa to 395.4 MPa and 343.8 MPa, respectively, and the elongation is decreased slightly. Meanwhile, the thermal conductivity is decreased from 109.4 W/(m·K) to 85.7 W/(m·K).

Key Words: Aluminum Alloy, Zn Element, Thermal Conductivity, Mechanical Properties, Microstructure

铝合金具有密度小、强度高、综合性能良好等特点,因此被广泛应用于散热器、电子通讯等领域^[1~4]。电子产品不断趋于轻量化、微型化,同时对电脑、手机、平板等电子产品的运行性能要求也与日俱增。而根据相关统计数据显示,有 55% 左右的电子零件由于设备过热或其他热相关的问题而失效^[5],而半导体元件的温度升高 10℃ 也会导致其服役可靠性降低 50% 左右,并且失效率也会随着温度的升高而升高^[6]。另外,电子产品在日常使用过程中由于撞击、跌落、弯曲等情况造成的设备损坏也需要通过提高材料的力学性能来改善。目前已有材料的综合性能难以同时满足设备运行时散热和力学性能要求^[7],因此,开发具有高强度、高导热的材料变得尤为重要。

影响铝合金导热性能和力学性能的因素较多,主要包括以下 3 个方面^[8]:①合金元素及其形成相在铝基体中的固溶度;通过影响铝基体晶格畸变的程度来影响合金的热导率;其他元素与 Al 之间或者其他元素之间形成强化相来影响强度;②杂质和缺陷数量越多,合金的致密度越差,热导率和强度越低;③热处理。通过影响合金中相的形态、尺寸和分布来改变对运动电子的散射作用,进而影响合金的热导率,以及强化相的析出情况,都在一定程度上对铝合金的热导率及力学性能有影响。其中合金元素是影响合金热导率及力学性能的主要因素之一,这主要取决于合金元素的存在形式和含量^[9]。基于研究现状^[9~11],邓邦惠等^[12]发现,Al10SiMnMg 合金压铸后其热导率为 125 W/(m·K),抗拉强度与屈

收稿日期:2021-09-12; **修改稿收到日期**:2021-10-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51974092);广东省基础与应用基础研究基金区域联合基金资助项目(2020B1515120065);广东省教育厅普通高校重点领域专项资助项目(2020ZDZX2058);广东省重点领域研发计划资助项目(2020B010186002)

第一作者简介:李正伟,男,1996 年出生,硕士研究生,沈阳(110870),E-mail:851293817@qq.com

通信作者:李润霞,女,1971 年出生,教授,广东东莞(523808),E-mail:Runxiali@163.com

引用格式:李正伟,陈明,郝建飞,等.压铸 Al-Zn-Si-Cu 合金的力学与导热性能[J].特种铸造及有色合金,2022,42(5):579-582.

LI Z W, CHEN M, HAO J F, et al. Mechanical properties and thermal conductivity of casting Al-Zn-Si-Cu alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(5):579-582.

服强度分别为 155 MPa、80 MPa。ZL101 合金低压铸造成形后其热导率为 125 W/(m·K),抗拉强度与屈服强度分别为 155 MPa、95 MPa。但是,传统 Al-Si 合金的导热性能和力学性能均具有一定的局限性,不能完全满足实际工业生产及应用的需求。由于 Zn 在 α -Al 中的固溶度较低,对热导率的负面作用较小,通过添加 Zn,在保证 Al-Zn 合金良好的导热性能前提下,有望进一步提高铝合金的铸态室温力学性能。因此,本课题采用 Zn 作为强化元素,研究 Zn 含量为 12%~18% 的 Al-Zn 合金中显微组织、热导率以及力学性能的变化。同时,借助 SEM、OM、XRD 等检测手段,分析 Zn 在合金内部存在的形式,以揭示 Zn 对 Al-Zn 合金力学性能和热导率的影响。

1 试验方法

1.1 试验原料

试验合金的化学成分见表 1。原材料采用 99.7% 的纯铝、99.8% 的纯 Zn、99.9% 的纯 Cu、Al-30Si、Al-10Mn 和 Al-10Fe 中间合金配制而成。

表 1 Al-xZn-8Si-2Cu 合金的化学成分

目标 Zn 含量/%	w _B					
	Si	Zn	Cu	Mn	Fe	Al
12	8.29	12.07	2.29	0.23	0.27	余量
14	8.24	14.11	2.31	0.19	0.33	余量
16	8.42	16.35	2.16	0.21	0.29	余量
18	8.40	18.27	2.43	0.24	0.34	余量

1.2 试验方法

将纯铝加入到电阻炉中加热熔化,熔炼温度为 730℃。后续加入 Al-10Mn 中间合金、Al-10Fe 中间合金、Zn、Cu 以及 Al-30Si 中间合金,待所有合金全部熔化后使用钨棒搅拌,使合金成分分布均匀。然后静置,扒渣后压铸拉伸试样,其尺寸见图 1。加入少量 Fe 便于铸件脱模。但由于 Fe 会降低合金的力学性能,因此,同时加入少量 Mn 以降低 Fe 的负面影响。采用 HD-B615-A-S 型微机控制电子万能材料试验机进行拉伸测

试。将试样表面磨抛至光洁,采用 FIRST FD-102 涡流电导仪进行电导率测试。通过线切割制得 10 mm×10 mm×10 mm 金相试样,用科勒试剂腐蚀 5~10 s 后立即用流水冲洗,并用酒精擦拭后吹干,再经过机械抛光后在 ZEISSM10A 扫描电镜下进行组织形貌及断口形貌观察。

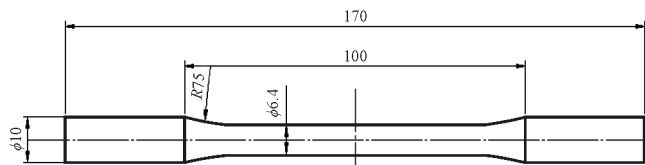


图 1 拉伸试样尺寸图

Fig.1 Diagram of dimension of tensile specimen

2 试验结果与分析

2.1 Zn 含量对合金的力学性能的影响

图 2 为 Al-xZn-8Si-2Cu 合金的力学性能。可以看出,随着 Zn 含量从 12% 提高到 18%,合金的抗拉强度从 345.5 MPa 提高到 395.4 MPa,屈服强度从 263.5 MPa 提高到 343.9 MPa,分别提高了 14.4%、30.5%;伸长率由 1.72% 降低到 1.15%。由此可见,Zn 含量的提高可显著提高合金的强度,但会使合金的塑性降低。

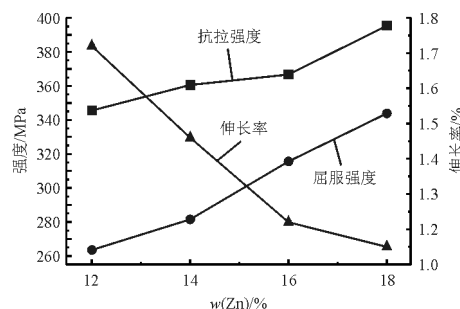


图 2 Al-xZn-8Si-2Cu 合金的力学性能

Fig.2 Mechanical properties of Al-xZn-8Si-2Cu alloy

2.2 断口形貌分析

图 3 为 Al-xZn-8Si-2Cu 合金的拉伸断口形貌。可以看出,断口出现少量解理平台和大量韧窝和撕裂棱。

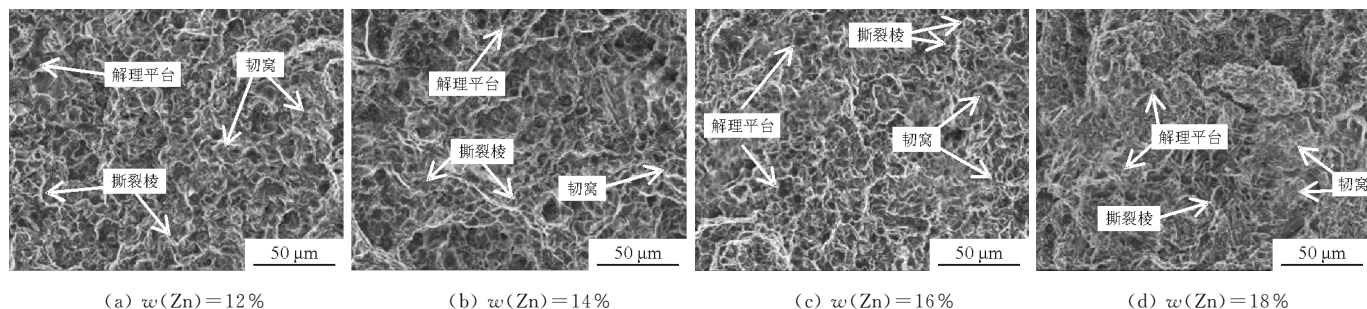


图 3 Al-xZn-8Si-2Cu 合金的断口形貌

Fig.3 Fracture morphology of Al-xZn-8Si-2Cu alloy

随着 Zn 含量增加,合金断口存在的韧窝数量和撕裂棱逐渐减少,解理平台面积相对增多。当 Zn 含量增加到 18%后,断口中的韧窝和撕裂棱数量最少,总体呈现脆性断裂特征。

2.3 Zn 含量对热导率的影响

图 4 为 Al-*x*Zn-8Si-2Cu 合金热导率随 Zn 含量的变化。可以看出,随着 Zn 含量增加,合金的热导率由 109.4 W/(m·K)降低到 85.7 W/(m·K),降低了 21.8%。金属材料热传导过程的实质是自由电子的热传导和晶格振动产生的热量。根据金属材料的晶体特征,金属材料的热传导方式以自由电子的热传导为主,因此金属的热导率和电导率存在一定的关系,即 Wiedemann-Franz 定律^[13]:

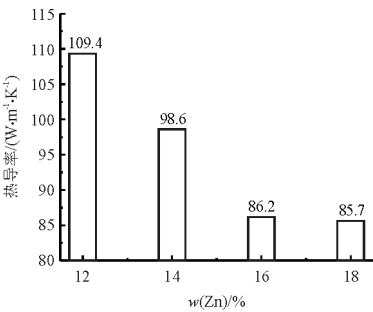


图 4 Al-*x*Zn-8Si-2Cu 合金的热导率

Fig.4 Thermal conductivity of Al-*x*Zn-8Si-2Cu alloys

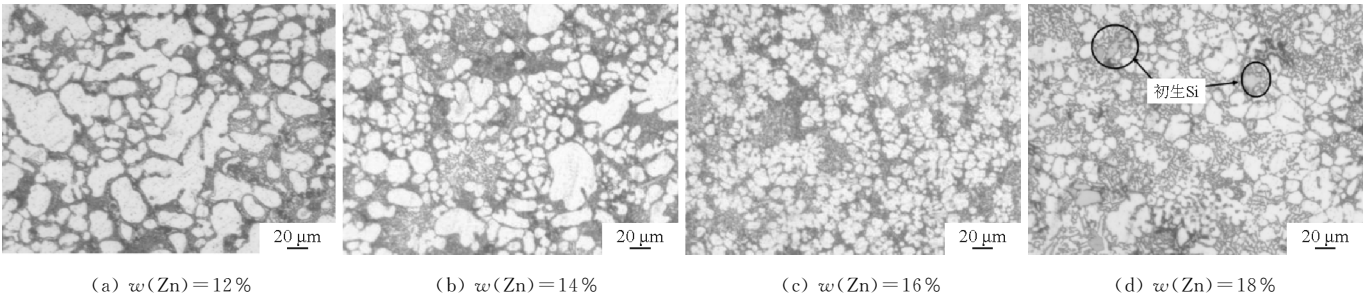


图 5 Al-*x*Zn-8Si-2Cu 合金的显微组织

Fig.5 Microstructure of Al-*x*Zn-8Si-2Cu alloy

增加导致的固溶在 α-Al 基体中的 Zn 含量提高,使晶格缺陷增多,从而降低热导率。

2.5 XRD 及 EDS 物相分析

图 6 为 Al-*x*Zn-8Si-2Cu 合金 XRD 图。可以看出, Al-*x*Zn-8Si-2Cu 合金主要由 Al、Al₂Cu、Zn、Si、Al₆(FeMn)等 5 种相组成。随着 Zn 含量提高,合金的相组成没有变化,且不含 Zn 的相的峰值以及位置未发生变化,而含 Zn 相的峰值有所提高,峰强度增加。

图 7 为 Al-*x*Zn-8Si-2Cu 合金的 SEM 形貌,表 2 为谱图 1~4 的 EDS 分析。可以看出,1 处白色点状相为在晶界处未溶解的富 Zn 相。由于 Zn 在 Al 中极限溶解度可达 32.8%,合金凝固过程中较多的 Zn 溶解进基

$$\frac{\lambda}{\delta} = LT$$

式中,λ 为材料的热导率;δ 为材料的电导率;L 为材料的洛伦兹常数,Al 的洛伦兹常数为 $L = 2.2 \times 10^{-8}$ W/(Ω·K);T 为热力学温度。

根据经典的导电导热理论,金属材料中的缺陷、晶界以及晶格畸变越少,金属材料的晶格越完整,其对电子的散射作用越小,导热性能越好。Zn 一部分溶解到 α-Al 基体中,改变了合金内部原有的晶格点阵,使晶格畸变增多。一部分未能溶解入基体,在晶界处形成富 Zn 相,减小了电子移动平均自由程,加大了电子通过的难度,从而使热导率降低。

2.4 Zn 对合金显微组织的影响

图 5 为 Al-*x*Zn-8Si-2Cu 合金的显微组织。可以看出, Al-12Zn-8Si-2Cu 合金中 α-Al 枝晶较为粗大,共晶组织中 Si 形态相对细小,分布较均匀,因此伸长率也较高。将合金中的 Zn 含量提高到 14%时,α-Al 枝晶尺寸明显变小,并且固溶在 α-Al 基体的 Zn 含量提高,对合金起到固溶强化作用。随着 Zn 含量继续提高到 18%, α-Al 枝晶尺寸进一步变小,固溶强化作用进一步增强,所以屈服强度得到提升;另一方面,Zn 的加入使共晶 Si 尺寸增大,这些尺寸变大的共晶 Si 存在一些锐利的尖角,会导致应力集中,降低合金的伸长率;同时 Zn 含量

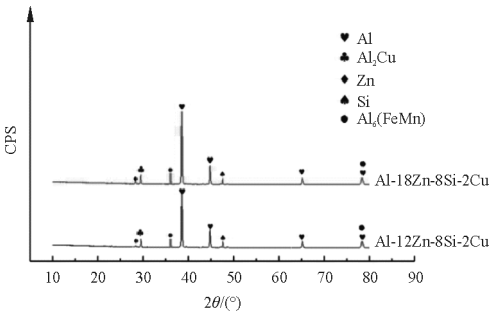


图 6 Al-*x*Zn-8Si-2Cu 合金的 XRD 图

Fig.6 XRD patterns of Al-*x*Zn-8Si-2Cu alloys

体中,且由于该位置在 Al 基体附近,因此 EDS 结果中主要元素含量为 Al,Zn 含量较低。2 处灰色块状为初

生 Si 相,3 处呈汉字状的为 $\text{Al}_6(\text{FeMn})$ 相。由于 Fe、Mn 含量较低,并且形成的汉字状 $\text{Al}_6(\text{FeMn})$ 相较少,不会对组织产生割裂作用,因此对合金的力学性能影响

较小。4 处灰白色短棒状为 Al_2Cu 相。随着 Zn 含量增加,第二相粒子的形貌、数量以及尺寸变化不明显。可见,Zn 含量的提高对于合金中第二相粒子影响不大,此

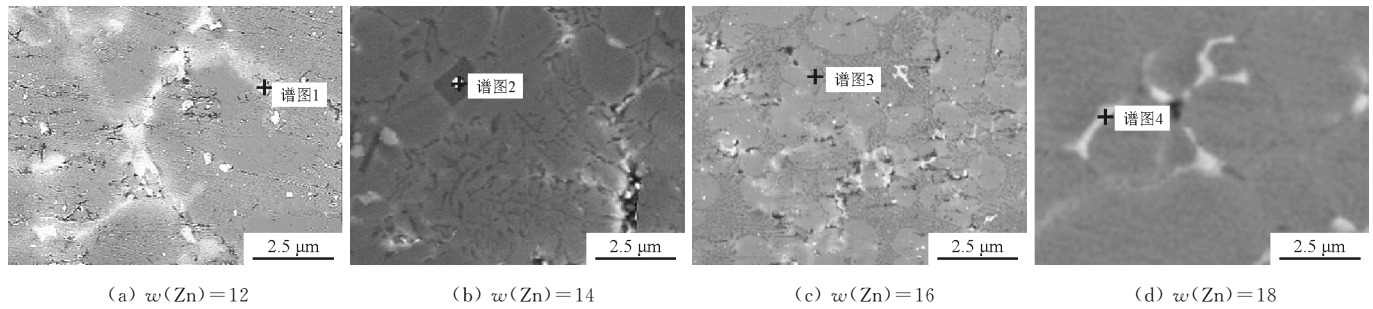


图 7 Al- x Zn-8Si-2Cu 合金 SEM 形貌

Fig.7 SEM morphologies of Al- x Zn-8Si-2Cu alloy

表 2 Al- x Zn-8Si-2Cu 合金 EDS 结果

Tab.2 EDS results of Al- x Zn-8Si-2Cu alloy %						
位置	x_B					
	Al	Si	Zn	Cu	Fe	Mn
1	89.15	1.51	8.59	0.75	—	—
2	9.02	87.62	3.36	0.64	—	—
3	80.35	0.43	—	—	11.94	7.58
4	77.70	10.64	2.72	9.12	—	—

结果也与 XRD 结果相符合。

3 结 论

(1)随着 Al- x Zn-8Si-2Cu 合金中 Zn 含量提高,固溶在 α -Al 基体中的 Zn 含量不断提高,对合金起到固溶强化作用,同时还使共晶 Si 尺寸增大。这些尺寸变大的共晶 Si 存在一些锐利的尖角,会发生应力集中,降低合金的伸长率;固溶在 α -Al 相中的 Zn 含量提高会使晶格缺陷增多,降低热导率。

(2)Zn 含量的提高可以显著提升 Al- x Zn-8Si-2Cu 合金的强度,但会降低合金的伸长率和热导率。当合金中的 Zn 含量从 12% 增加到 18% 时,合金的抗拉强度和屈服强度分别从 345.5 MPa、263.5 MPa 提高到 395.4 MPa、343.8 MPa,提高了 14%、30.5%;热导率由 109.4 W/(m·K)降低到 85.7 W/(m·K)。

(3)Zn 含量提高对 Al- x Zn-8Si-2Cu 合金组织中相组成影响较小,断口组织中的韧窝和撕裂棱数量随 Zn 含量增加而增加,解理平台相对面积随 Zn 含量增加而减少,总体呈现脆性断裂特征。

参 考 文 献

[1] SHAJI M C, RAVIKUMAR K K, RAVI M, et al. Development of a high strength cast aluminium alloy for possible automotive applications[J]. Materials Science Forum, 2013, 765: 54-58.
[2] HIRSCH J, Al-SAMMAN T. Superior light metals by texture engineering: Optimized aluminum and magnesium alloys for automo-

tive applications[J]. Acta Materialia, 2013, 61(3): 818-843.
[3] YUAN W H, LIANG Z Y. Effect of Zr addition on properties of Al-Mg-Si aluminum alloy used for all aluminum alloy conductor[J]. Materials & Design, 2011, 32(8-9): 4 195-4 200.
[4] TZOU G J, TSAO C C, LIN Y C. Improvement in the thermal conductivity of aluminum substrate for the desktop PC central processing unit(CPU) by the Taguchi method[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2010, 34(6): 706-710.
[5] JANICKI M, NAPIERALSKI A. Modelling electronic circuit radiation cooling using analytical thermal model[J]. Microelectronics Journal, 2000, 31(9-10): 781-785.
[6] ZWEBEN C. Advances in high-performance thermal management materials[J]. Journal of Advanced Materials, 2007, 39(1): 3-10.
[7] 王梦洁. $\text{AlN}_p/\text{Al}_3\text{BC}_p$ 对铸造 Al-Zn 系合金导电/导热性和力学性能的影响与调控[D]. 济南: 山东大学, 2020.
[8] HUANG Y Y, HU Z L. Research progress on the aluminum alloy with high thermal conductivity[J]. Mechanics and Materials, 2014, 574: 396-400.
[8] 杨涤心, 夏青, 杨留栓. 铸造铝-硅合金的电导率与化学成分[J]. 特种铸造及有色合金, 2002(4): 58-60.
[9] KAYA H, BOYUK U, GADIRH E, et al. Measurements of the microhardness, electrical and thermal properties of the Al-Ni eutectic alloy[J]. Materials & Design, 2012, 34: 707-712.
[10] ROHATGI P K, PRABHAKAR K V. Wrought aluminum-nickel alloys for high strength-high conductivity applications[J]. Metallurgical Transactions, 1975, A6(5): 1 003-1 008.
[11] CASARI D, LUDWIG T H, MERLIN M, et al. The effect of Ni and V trace elements on the mechanical properties of A356 aluminium foundry alloy in as-cast and T6 heat treated conditions[J]. Materials Science & Engineering, 2014, A610: 414-426.
[12] 邓邦惠, 余云. 一种高导热压铸铝合金及其制备方法: 中国专利, CN104264017A[P]. 2015-01-07.
[13] KLEMENS P G, WILLIAMS R K. Thermal conductivity of metals and alloys[J]. International Metals Reviews, 1986, 31(1): 197-215.

(编辑: 栗万仲)