

闫石,陶诚,匡中华,等.Zn 元素对铝合金力学性能的影响[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2025,40(2):92-98.doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2025.02.011

YAN S, TAO C, KUANG Z H, et al. On the Effect of Zn Element on the Mechanical Properties of Aluminum Alloy[J].Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2025, 40 (2): 92-98. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2025.02.011

Zn 元素对铝合金力学性能的影响

闫石¹,陶诚²,匡中华²,徐光周²,郭一民^{1,3},李晓星¹,支倩⁴,张涛^{1*}

(1.北京航空航天大学 材料科学与工程学院,北京 102206;2.广东铭利达科技有限公司,广东 东莞 523660;
3.西安航天发动机有限公司,陕西 西安 710100;4.湖南科技大学 材料科学与工程学院,湖南 湘潭 411201)

摘要:通过调控压铸铝合金(A380)中Zn的含量,研究Zn含量对合金的微观结构和性能的影响,样品中Zn的质量分数分别为17.5%,19.5%,21.5%。通过对室温下工程应力-应变曲线、真实应力-应变曲线和应变硬化率曲线的分析,发现超过屈服点后,真实应力显著大于名义应力,这是由于计算时进行了材料体积守恒的假设。采用应变硬化率来表征材料的均匀塑性变形能力。结果表明:随着Zn含量的增加,合金的强度和塑性均有所提升,其中,试样的抗拉强度从压铸铝合金(A380)的240 MPa提升至Al-Zn-Si-Cu合金的320 MPa,提升幅度为33%。结合微观组织分析可知:Zn元素主要固溶于Al基体中,起到固溶强化的作用,从而提高合金的强度。

关键词:Al-Zn-Si-Cu合金;抗拉强度;脆性断裂;韧性断裂;纳米晶

中图分类号:TF821 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2025)02-0092-07

On the Effect of Zn Element on the Mechanical Properties of Aluminum Alloy

YAN Shi¹, TAO Cheng², KUANG Zhonghua², XU Guangzhou²,
GUO Yimin^{1,3}, LI Xiaoxing¹, ZHI Qian⁴, ZHANG Tao¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 102206, China;

2. Guangdong Minglida Technology Co., Ltd., Dongguan 523660, China;

3. Xi'an Space Engine Company Limited, Xi'an 710100, China;

4. School of Materials Science and Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The influence of Zn content on the microstructure and properties of die cast aluminum alloy (A380) is studied by regulating the Zn content. The Zn contents by mass of the samples are 17.5%, 19.5%, and 21.5%, respectively. A study of engineering stress-strain curve, real stress-strain curve, and strain hardening rate curve at room temperature finds that after exceeding the yield point, the actual stress is significantly greater than the nominal stress, which is due to the assumption of material volume conservation during calculation. Therefore, this paper uses strain hardening rate to characterize the uniform plastic deformation ability of the material. The research results indicate that with the increase of Zn content, the strength and plasticity of the alloy increase. Among them, the tensile strength increases from 240 MPa for A380 die cast aluminum alloy (as cast) to 320 MPa for Al-Zn-Si-Cu alloy, with an increase of 33%. Based on the analysis of microstructure, it can be

收稿日期:2024-07-25

基金项目:东莞市引进创新科研团队计划资助项目(2020607234003)

*通信作者,E-mail: zhangtao@buaa.edu.cn

concluded that Zn element mainly dissolves in the Al matrix in aluminum alloy, playing a role in solid solution strengthening and improving the strength of the alloy.

Keywords: Al-Zn-Si-Cu alloy; tensile strength; brittle fracture; ductile fracture; nanocrystals

近年来,我国铝产量和消费量均居世界第一,市场需求的增加和电子类产品小型化、汽车飞机轻量化的发展趋势对铝合金的性能提出了更高的要求^[1-5].研究表明:每降低10%的车身自重,发动机效率可提升19%,燃油消耗可减少5%~8%^[6-8].因此,减轻自重是汽车更省油、更环保的有效措施^[9-12].铝合金是汽车轻量化的理想材料^[11-17],特别是对于汽车和电子类产品使用的薄壁精细铸件来说,不仅需要良好的强度和热导率,还需要具备优异的铸造性能.然而,现有的铸造铝合金材料如常用于引擎支架、变速箱和散热器领域的压铸铝合金(A380)无法完全满足这些性能需求,因此,高性能铝合金材料的开发和研究就显得尤为重要.

针对铸造铝合金性能的研究主要集中在合金化、热处理工艺和塑性变形工艺等方面.ZHU等^[18]研究不同时效路线和不同硅含量(0.55%~1.08%,质量分数,下同)的Al-Mg-Si-Cu-Zn合金的析出演化和力学行为;WANG等^[19]研究Al-Si-Cu-Mg-Zn合金的铸态组织以及时效过程中的析出物和硬度的变化,以评估短时间低温时效强化的效果;ALEMDAG等^[20]探讨多向锻造(Multi-Directional Forging, MDF)对Al-7Si-4Zn-3Cu合金显微组织和拉伸性能的影响.本文通过分析Zn含量对铝合金力学性能的影响机制,设计并制备一种新合金组分,以压铸铝合金(A380)为基础,将其抗拉强度从240 MPa提升至320 MPa,提升幅度为33%,并得出合金综合性能最优的Zn添加量为19.5%.由Al-Zn二元合金相图可知:室温下Zn在Al中的固溶度不足1%,而在高温时,Zn在Al中的固溶度较高,在382℃时可达82.8%,在125℃时降至5.6%,导致Al-Zn合金在常规铸造时出现自动淬火的现象.当Zn的添加量较少时,会全部固溶于铝基体中,起到固溶强化的作用,不会在组织中形成可见相;当Zn的含量增加时,过剩的锌会在晶界处形成铝锌的亚共晶及共晶 β (AlZn)组织.此外,Zn与Al的原子半径相近,在Al中会形成置换固溶体,且引起的晶格畸变较小,因此,对成形性和流动性的影响也较小^[6].当Zn的含量低于20%时,增加Zn的含量会降低Al-Zn合金的固相线和液相线,从而可在较低温度下熔炼和浇注铝合金,有效减少铝的氧化和锌的烧损.然而,单一Zn元素的添加会导致锌从过饱和 α 固溶体中析出并以第二相的形式存在,第二相与 α 固溶体之间存在电位差且显微硬度低于 α 固溶体,从而导致合金的耐蚀性和强度下降,使得简单的Al-Zn二元合金早已失去工业价值,仅用于早期开发.因此,本文在多种合金元素的基础上大幅增加了Zn的含量.

1 试验

1.1 样品制备

本文研究的合金主要含有Al, Zn, Si, Cu, Mn等元素,样品的Zn含量分别为17.5%, 19.5%, 21.5%.熔炼采用的原材料包括纯Al(99.99%), AlZn₂₀, AlSi₃₀, AlCu₅₀, AlMn₂₀中间合金.制备流程如下:(1)物料称量;(2)熔炼前准备:将各类工具和模具表面均匀涂抹氧化锌涂料,并将工具和物料放入200℃的干燥箱中预热;(3)合金制备:在750℃时依次加入纯Al, AlCu₅₀, AlSi₃₀, AlMn₂₀和AlZn₂₀,分别保温30, 20, 10 min,然后将温度降至720℃,加入0.5%的覆盖剂(NaCl和KCl的质量比为1:1)和0.5%的精炼剂C₂Cl₆,保温10 min后去除浮渣,静置5 min后将合金浇注至钢模中,得到铸造合金试样.

1.2 样品表征

采用马尔文帕纳科Empyrean的X射线衍射仪进行X射线衍射(X-Ray Diffraction, XRD)分析,参数设置如下:扫描速度为2(°)/min,扫描角度为20°~90°,步长为0.013°,工作电压为45 kV,电流为40 mA.采用ThermoFisher/Helios G4 CX型扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)对合金的组织形貌进行观察和分析,分析前将样品打磨抛光至光亮无划痕.采用万能试验机Instron 5565对合金的拉伸性能进行测试,应变速率为 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$.采用维氏硬度仪表征合金的显微硬度,压头为标准维氏金刚石压头,载荷为1.96或4.90 N,作用时间为15 s,每个样品至少测量20个点,取平均值作为最终的显微硬度.

2 结果与讨论

图1为不同Zn含量铸造试样的光学显微镜图像.由图1可知:组织中存在着2种衬度不同的相,一种为亮白色的基体铝相,另一种为灰黑色的硅相.根据形态差异,硅可分为2种,其中,粗大的块状相为初晶硅,而细小的板条状相为共晶硅.2种硅相在基体铝中均匀分布,随着Zn含量的增加,合金组织未发生明显变化,说明Zn对组织中硅相的形态和分布几乎没有影响.

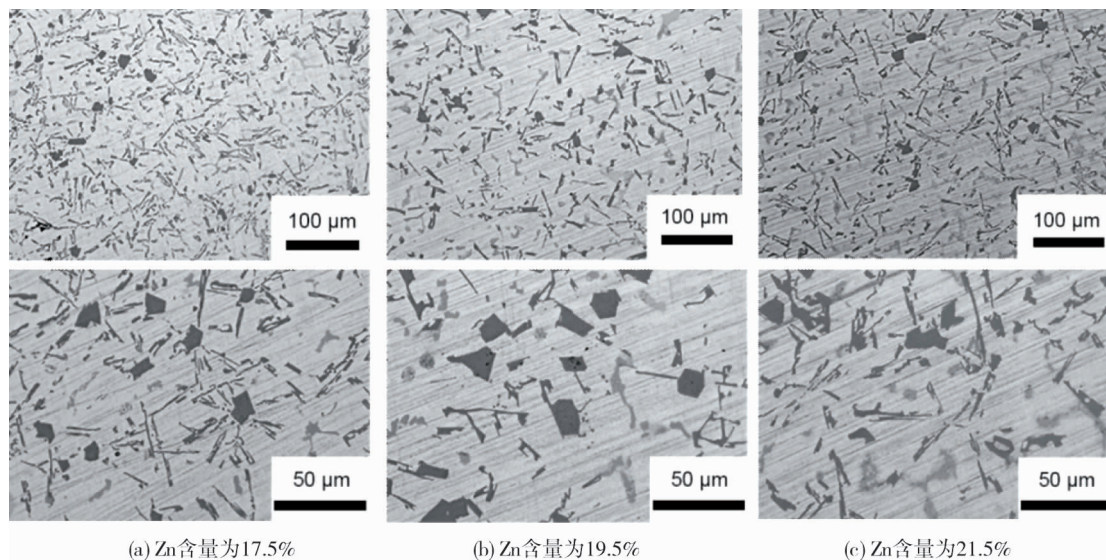


图1 不同Zn含量铸造合金的光学显微镜图像

图2为不同Zn含量铸造试样的背散射扫描电子显微镜图像.试验结果表明:组织中存在着3种衬度不同的相,分别为深灰色的基体Al相、黑色的Si相和浅灰色的 Al_2Cu 相.Si是商业铝合金中的主要添加元素,添加Si可以显著提高铝合金的铸造性能和强度.在共晶温度下,Si在Al中的最大溶解度接近1.65%,而在室温下,Si几乎不溶于Al.因此,析出物主要为纯硅,且随着硅浓度的增加而增多.此外,组织中还观察到少量含铜的明亮颗粒.

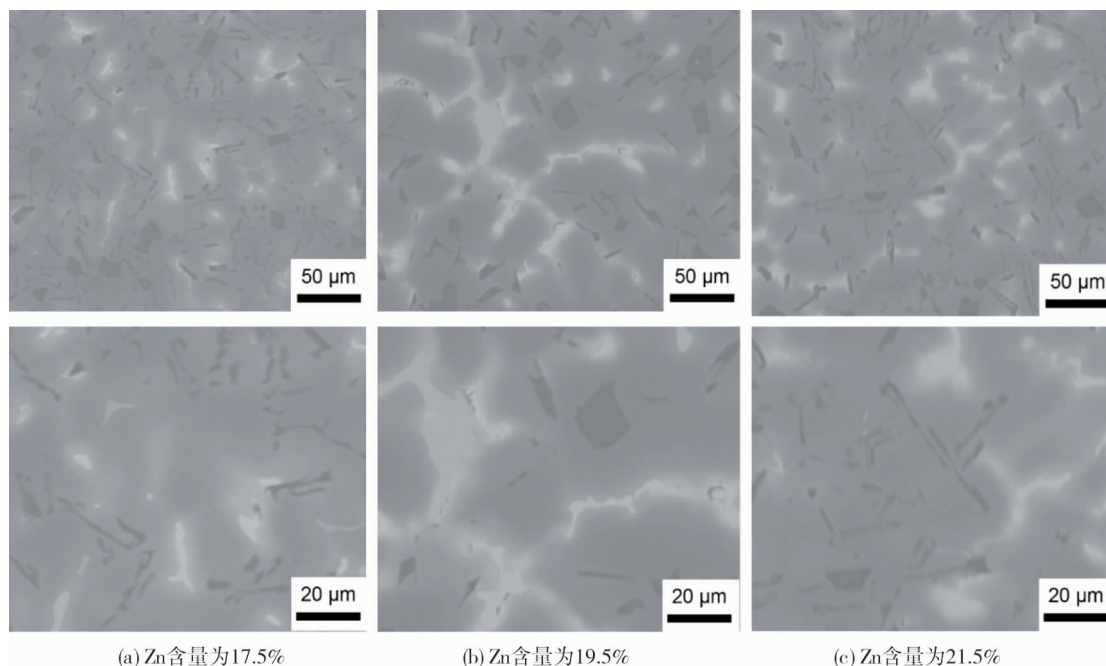


图2 不同Zn含量铸造合金的SEM图像

图3为不同Zn含量铸造试样的电子探针图像,用于评估所有元素的化学均匀性.由图3可知:3种合金

中的 Al 元素整体为红色, Zn 元素整体为浅蓝色, 而 Si, Cu, Mn 元素整体为蓝色. Al 和 Zn 这 2 种元素的浓度较高, 其中, Al 在组织中的分布较为均匀, 但局部存在块状和条状的蓝色相; Zn 在组织中也分布均匀, 但局部区域出现绿色相, 集中分布在蓝色块状和板条状结构的周围, 这些蓝色区域正是 Si 和 Cu 集中分布的区域. Si 和 Cu 在组织中发生聚集, 分别形成第二相 Si 和金属间化合物 Al_2Cu , 这些均为硬质相, 能够在合金中产生固溶强化或沉淀强化的效果. Mn 的含量较少, 主要与铝形成 Al-Mn 相. 综上所述, 随着 Zn 含量的增加, 合金中 Zn 的元素分布图中的红色部分增多, 表明 Zn 的含量升高, 而其他元素的分布未发生明显变化.

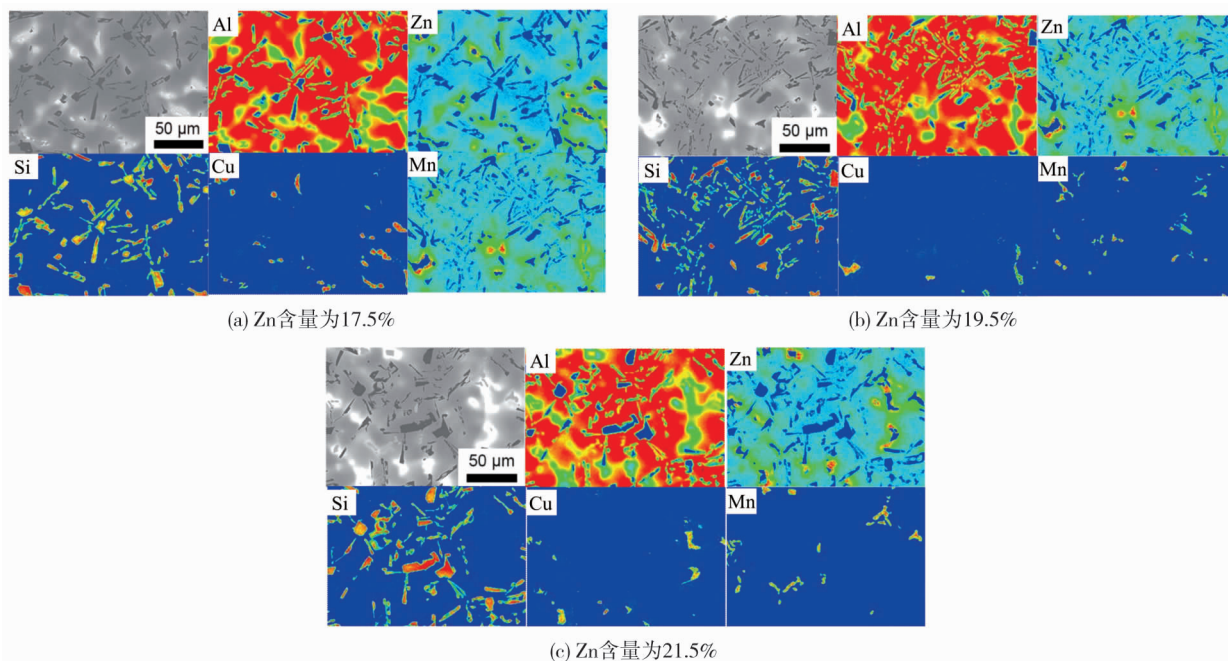


图3 不同 Zn 含量铸造合金的电子探针显微镜图像

结合的能谱分析(Energy Dispersive Spectroscopy, EDS)(图4)和XRD图谱(图5),可以确定含铜颗粒为 $\theta\text{-Al}_2\text{Cu}$ 相. Si 的分布与光镜观察结果类似, 初晶硅和共晶硅相在基体铝中均匀分布, 而 Al_2Cu 相则更倾向于在晶界附近形成. 随着 Zn 含量的增加, 合金组织的形态和分布未发生显著变化. 图4为含有 19.5% Zn 的铸造试样的 EDS 图. 为了进一步验证相的成分, 在合金组织中选取 2 种不同特征相的点状区域进行 EDS 测试, 分别为黑色块状相和白亮色块状相, 以获取合金中主要元素 Al, Si, Cu, Zn 在 2 种相中的化学含量分布. 由合金成分和电子探针(Electron Probe X-ray Micro-Analyzer, EPMA)结果可知: Mn 在合金中的含量较低($<1\%$), 难以均匀分布, 并存在部分富集区域, 因此在能谱测试时未能检测到 Mn 的存在. 试验结果表明: 白亮色块状相中主要含有 42.78% 的 Al 和 52.19% 的 Cu, 判断其为 Al-Cu 相. 将其转换为原子百分比后, Al 和 Cu 分别为 65.88% 和 34.12%, 比例接近 2:1, 根据比例可判定其为 Al_2Cu 相, 与前述光镜和扫描电镜的结果一致; 黑色块状相中主要含有 96.01% 的 Si 和 2.08% 的 Zn, 转换为原子百分比后, Si 和 Zn 分别为 99.08% 和 0.92%, 根据比例可判断其为纯硅相, 与前述光学显微镜和扫描电镜的结果相符.

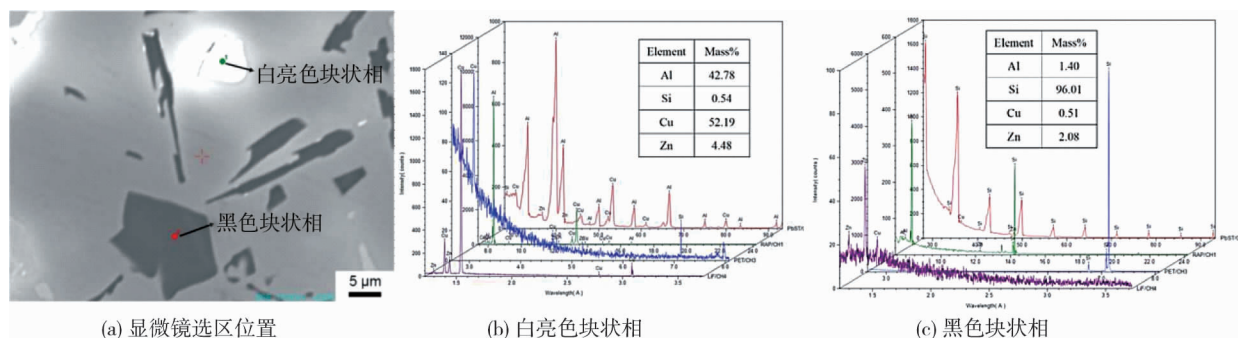


图4 19.5% Zn 铸造合金采用 EPMA 测得的 EDS 图

图 5 为不同 Zn 含量铸造试样的 XRD 图谱.分析结果表明:3 种合金中均含有相同的 3 种相,分别为基体 α -Al 相、初生 β -Si 相和化合物 θ - Al_2Cu 沉淀相.在 3 种合金中, $2\theta = 38^\circ$ 附近均出现 1 个强度最高的峰,对应于 Al 的 (111) 晶面,表明在 3 种相中 Al 的含量最高.除 Al 的衍射峰外, Si 的衍射峰强度次之,而 Al_2Cu 的衍射峰强度最低.随着 Zn 含量的增加,3 种合金中的相未发生明显的变化,仅部分衍射峰的强度有所改变,但没有出现位置变化或新的衍射峰.说明 Zn 含量的增加并未在合金组织中形成新相,也未对原有相的存在产生显著影响.

图 6 为不同 Zn 含量铸造试样在室温下的工程应力-应变曲线、真实应力-应变曲线和应变硬化率曲线.在弹性阶段,真实应力-应变曲线与工程应力-应变曲线基本一致,然而,在超过屈服点后,真实应力显著大于名义应力.这一现象源于 2 种曲线均基于体积不变的假设,即假定材料体积守恒.但在实际拉伸的过程中,材料体积会发生变化.工程应力-应变曲线是根据试样的原始尺寸进行计算,而真实应力-应变曲线则基于某一瞬时的实际尺寸进行计算,因此,真实应力-应变曲线更能准确反映材料的力学性能.此外,应变硬化率用于表征材料的均匀塑性变形能力,其数值越大,表明材料越不易进入分散状态,且应变强化能力越强.

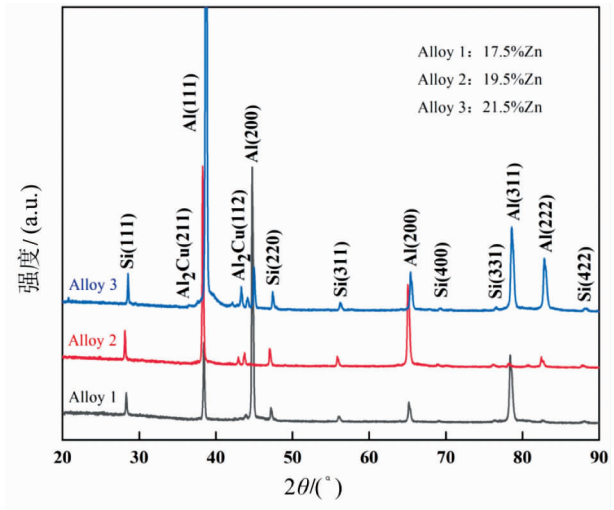


图 5 不同 Zn 含量铸造合金的 XRD 图谱

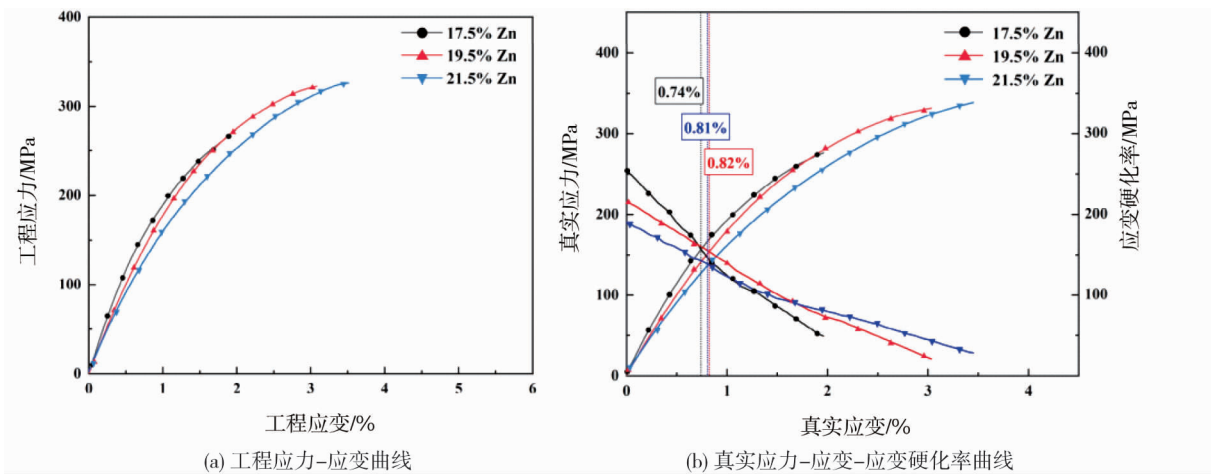


图 6 不同 Zn 含量铸造合金的力学性能曲线

由图 6(a)可知:对于含 21.5%Zn 的试样,其抗拉强度、屈服强度以及断后伸长率分别为 326 MPa, 225 MPa 和 1.4%.与含 21.5%Zn 的试样相比,含 19.5%Zn 的试样的抗拉强度和断后伸长率有所降低,分别为 322 MPa 和 1.2%,其屈服强度为 250 MPa,高于含 21.5%Zn 试样的 225 MPa.而对于含 17.5%Zn 的试样,其抗拉强度、屈服强度以及断后伸长率均显著降低,分别为 274 MPa, 205 MPa 和 0.7%.综上所述,在 3 种合金中,含 21.5%Zn 的合金拉伸性能最优,而含 17.5%Zn 的合金拉伸性能最差.与压铸铝合金 (A380) 的抗拉强度 240 MPa 相比,3 种合金的抗拉强度分别提高 14%, 34%, 36%.随着 Zn 含量的增加,合金的强度提高,这主要归因于 Zn 在 Al 基体中的固溶强化作用.然而,3 种合金的断后伸长率与压铸铝合金 (A380) 的 2.5% 相比有所降低,而随着 Zn 含量的增加,合金的塑性有所提高.由图 6(b)可知:在应变硬化率曲线的前半段,3 种合金应变硬化率的关系为 17.5% Zn > 19.5% Zn > 21.5% Zn,而在后半段则为 21.5% Zn > 19.5% Zn > 17.5% Zn.这是由于 3 条曲线的初始斜率不同,并且在整个应变过程中曲线的斜率发生变化.含 17.5%Zn 和 21.5%Zn 的合金应变硬化率曲线的斜率在应变为 1% 附近出现降低,而含 19.5%Zn 的合金应变硬化率曲线的斜率在整个应变过程中未发生显著改变.通过真实应力-应变-应变硬化率曲线的交点可

得 3 种合金的均匀延伸率分别为 0.74%, 0.82%, 0.81%.表 1 为不同 Zn 含量铸造试样的力学性能.

表 1 不同 Zn 含量铸造合金的力学性能

样品	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率/%	显微硬度/HV
17.5%Zn	274	205	0.7	172.3
19.5%Zn	322	250	1.2	170.2
21.5%Zn	326	225	1.4	172.8
A380(铸态)	240	120	2.5	76.0

由表 1 可知:3 种合金的显微硬度分别为 172.3, 170.2, 172.8 HV,约为压铸铝合金(A380)显微硬度(76.0 HV)的 2.2 倍.随着 Zn 含量的增加,3 种合金的微观组织没有明显差异,显微硬度也没有明显的变化.在测量的过程中,合金的硬度值会出现波动,这是由于合金中不仅包含硬度较高的 Si 相和 Al₂Cu 相,还存在硬度较低的 Al 基体.图 7 为不同 Zn 含量铸造合金的显微硬度.

图 8 为不同 Zn 含量铸造合金拉伸变形后的断口形貌.由图 8 可知:3 种合金的断口形貌中存在大量小平面,这些小平面的形成主要归因于合金中脆性粒子 Si 和 Al₂Cu 的存在.在变形的过程中,这些脆性粒子引发局部应力集中,当局部应力超过粒子自身的抗拉强度时,粒子穿晶断裂,从而产生大量的小平面,这是解理断裂的典型特征.解理面之间的连接以二次解理形成的台阶为主,较大的解理面和由解理台阶形成的发达河流花样清晰且连续.此外,断口中没有观察到明显的韧窝,表明合金的塑性较差.随着 Zn 含量的增加,脆性粒子穿晶断裂导致解理面的数量和尺寸减小,合金的塑性有所改善,但仍表现为脆性断裂.因此,3 种合金的断裂方式均属于典型的脆性断裂,这一结果与合金较低的拉伸塑性一致.

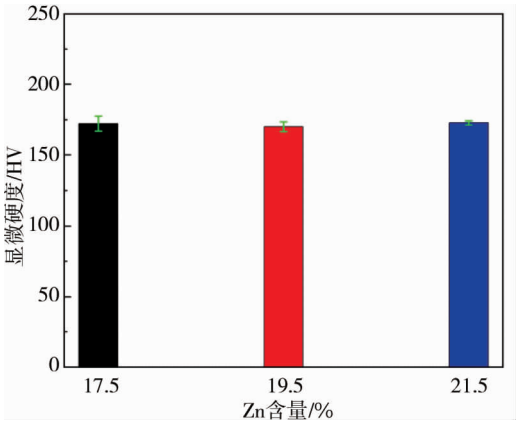


图 7 不同 Zn 含量铸造合金的显微硬度

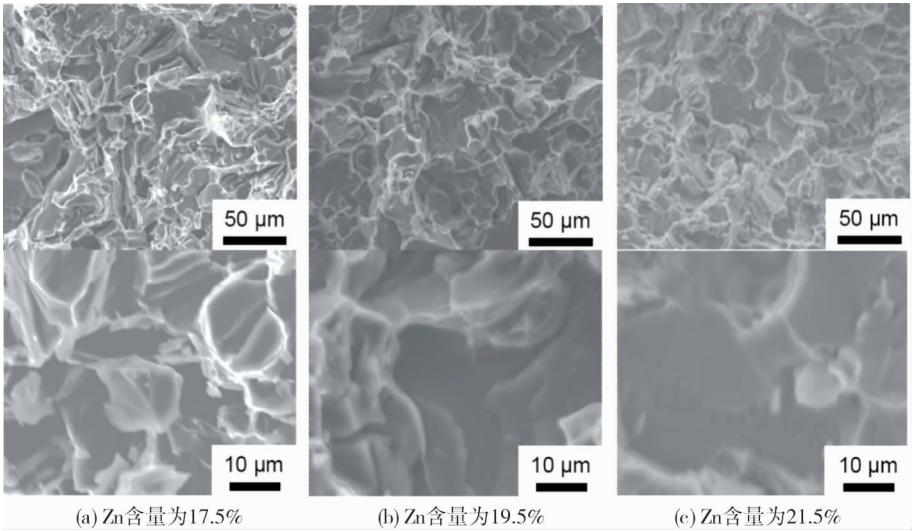


图 8 不同 Zn 含量铸造合金的断口形貌

3 结论

- 1) 3 种合金均主要包含 3 种相,分别为基体 Al 相,Si 相以及 Al₂Cu 相.Zn 含量的增加对组织中相的形态、分布以及其他元素的分布未产生明显的影响.XRD 结果表明:不同合金仅表现出衍射峰强度的变化,未出现位置变化或新的衍射峰,说明 Zn 含量的增加对相的种类无显著影响.
- 2) 随着 Zn 含量的增加,合金的强度和塑性均有所提升,其中,抗拉强度从压铸铝合金(A380)的

240 MPa 提升至 Al-Zn-Si-Cu 合金的 320 MPa, 提升幅度为 33%。结合微观组织分析可知: Zn 元素在铝合金中主要固溶于 Al 基体中, 起到固溶强化的作用, 从而促进合金强度的提高。尽管合金的塑性随 Zn 含量的增加略有改善, 但是整体仍处于较低水平, 断口形貌分析进一步表明 3 种合金仍以脆性断裂为主。

参考文献:

- [1] MILLER W S, ZHUANG L, BOTTEMA J, et al. Recent development in aluminium alloys for the automotive industry[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2000, 280(1): 37-49.
- [2] 孔德明. Cu 元素及热处理工艺对 6016 铝合金组织及性能的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2019.
- [3] HIRTH S M, MARSHALL G J, COURT S A, et al. Effects of Si on the aging behaviour and formability of aluminium alloys based on AA6016[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2001, 319: 452-456.
- [4] MEYRUEY G, MASSARDIER V, LEFEBVRE W, et al. Over-ageing of an Al-Mg-Si alloy with silicon excess[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 730: 92-105.
- [5] LIANG W J, ROMETSCH P A, CAO L F, et al. General aspects related to the corrosion of 6xxx series aluminium alloys: Exploring the influence of Mg/Si ratio and Cu[J]. *Corrosion Science*, 2013, 76: 119-128.
- [6] XIAO D H, WANG J N, DING D Y, et al. Effect of Cu content on the mechanical properties of an Al-Cu-Mg-Ag alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2002, 343(1/2): 77-81.
- [7] DING L P, JIA Z H, NIE J F, et al. The structural and compositional evolution of precipitates in Al-Mg-Si-Cu alloy[J]. *Acta Materialia*, 2018, 145: 437-450.
- [8] ESMAEILI S, LLOYD D J. Effect of composition on clustering reactions in AlMgSi(Cu) alloys[J]. *Scripta Materialia*, 2004, 50(1): 155-158.
- [9] DING L P, JIA Z H, LIU Y Y, et al. The influence of Cu addition and pre-straining on the natural aging and bake hardening response of Al-Mg-Si alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 688: 362-367.
- [10] JI S X, YANG W C, GAO F, et al. Effect of iron on the microstructure and mechanical property of Al-Mg-Si-Mn and Al-Mg-Si diecast alloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 564: 130-139.
- [11] 刘胜胆, 游江海, 张新明, 等. 双重淬火对 7055 铝合金组织性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2009, 30(6): 69-74.
- [12] VATNE H E, ENGLER O, NES E. Influence of particles on recrystallisation textures and microstructures of aluminium alloy 3103[J]. *Materials Science and Technology*, 1997, 13(2): 93-102.
- [13] DAMAVANDI E, NOUROUZI S, RABIEE S M, et al. EBSD study of the microstructure and texture evolution in an Al-Si-Cu alloy processed by route A ECAP[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 858: 157651.
- [14] BOUQUEREL J, DELBOVE M, VOGT J B. Advanced processing of EBSD data to distinguish the complex microstructure evolution of a Cu-Ni-Si alloy induced by fatigue[J]. *Materials Characterization*, 2018, 145: 556-562.
- [15] CAO H X, SUN Q C, PU Q Q, et al. Effect of vacuum degree and T6 treatment on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Cu alloy die castings[J]. *Vacuum*, 2020, 172: 109063.
- [16] ZHAO Y X, LI H, LIU Y, et al. The microstructures and mechanical properties of a highly alloyed Al-Zn-Mg-Cu alloy: The role of Cu concentration[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 18: 122-137.
- [17] BORKAR H, SEIFEDDINE S, JARFORS A E W. *In-situ* EBSD study of deformation behavior of Al-Si-Cu alloys during tensile testing[J]. *Materials & Design*, 2015, 84: 36-47.
- [18] ZHU L, GUO M X, ZHANG J S. Effect of silicon content on nucleation and growth of multiscale precipitates in Al-Mg-Si-Cu-Zn alloys for different aging paths[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 841: 143016.
- [19] WANG D T, LIU S C, ZHANG X Z, et al. Fast aging strengthening by hybrid precipitates in high pressure die-cast Al-Si-Cu-Mg-Zn alloy[J]. *Materials Characterization*, 2021, 179: 111312.
- [20] ALEMDAG Y, KARABIYIK S, MIKHAYLOVSKAYA A V, et al. Effect of multi-directional hot forging process on the microstructure and mechanical properties of Al-Si based alloy containing high amount of Zn and Cu[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 803: 140709.