

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2026.5263

桥梁缆索热铸锚用 Zn-Al-Cu 合金组织和性能研究

王 飞

(江苏法尔胜缆索有限公司, 江苏 无锡 214445)

摘 要:随着大跨径桥梁的发展和缆索强度的提高,对缆索热铸锚用锌合金的力学性能和耐腐蚀性能等提出了更高的要求,亟需开发适用的锌合金材料。采用金属型重力铸造法制备了 Zn-xAl-1Cu(x=6、7、8、9,质量分数,%)合金,通过光学显微镜、扫描电镜、拉伸测试、流动性测试和腐蚀失重试验等方法,研究了合金的显微组织、力学性能、流动性及耐腐蚀性能。结果表明,合金的显微组织均由初生 α -Al 相和(α -Al+ η -Zn)共晶相组成,随着 Al 含量的增加, α -Al 相数量明显增加,且分布更加均匀,合金的拉伸强度呈先增加后略有下降的趋势,而伸长率变化不大。当 Al 含量为 8%时,合金的拉伸强度和伸长率达到最佳,分别为 258 MPa 和 1.83%。此外,Al 含量增加有效提高了合金的耐腐蚀性能,但会降低流动性,Zn-9Al-1Cu 合金腐蚀速率为 0.103 g/(m²·h),较 Zn-6Al-1Cu 合金降低了约 37%。

关键词:Zn-Al-Cu 铸造合金;显微组织;力学性能;流动性;耐蚀性

中图分类号: TG146

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2026)09-1019-08

Research on the Microstructure and Properties of Zn-Al-Cu Alloys for Thermal Casting Anchors of Bridge Cables

WANG Fei

(Jiangsu Fasten Steel Cable Co., Ltd., Wuxi 214445, China)

Abstract: With the development of long-span bridges and the improvement in cable strength, higher requirements are placed on the mechanical properties and corrosion resistance of zinc alloys for thermal castable cables. Therefore, the development of suitable zinc alloy materials is urgent. Zn-xAl-1Cu (x= 6, 7, 8 and 9, wt.%) was prepared by metal mold gravity casting. The microstructure, mechanical properties, fluidity and corrosion resistance of the alloy were studied by means of optical microscopy, scanning electron microscopy, tensile testing, fluidity testing and corrosion weight loss testing. The results show that the microstructure of the alloy is composed of a primary α -Al phase and an α -Al+ η -Zn eutectic phase. With increasing Al content, the number of primary α -Al phases clearly increases, and the distribution is more uniform. The tensile strength of the alloy first increases but then decreases slightly, but it has little effect on the elongation of the alloy. When the Al content is 8 wt.%, the tensile strength and elongation of the alloy are the greatest, which are 258 MPa and 1.83%, respectively. In addition, an increase in the Al content effectively increases the corrosion resistance but reduces the fluidity of the alloy. The corrosion rate of the Zn-9Al-1Cu alloy is 0.103 g/(m²·h), which is approximately 37% lower than that of the Zn-6Al-1Cu alloy.

Key words: Zn-Al-Cu casting alloy; microstructure; mechanical properties; fluidity; corrosion resistance

随着交通基础设施的建设与发展,以悬索桥和斜拉桥为代表的大跨径缆索承重桥梁凭借合理的材料利用率、卓越的跨越能力及优美的造型,在桥梁建设中得到了广泛应用^[1-2]。作为悬索桥的主要承载构件,主缆索股及吊索锚固结构一般采用热铸锚

技术^[3],即将缆索索体端头钢丝在锥形内腔的锚具内均匀分散开,通过浇铸低熔点合金使散开的钢丝在锚具内形成楔形铸体;在缆索受拉时,依靠合金与钢丝之间的黏结力及合金锥体对钢丝产生楔紧作用来锚固固体。目前,缆索热铸锚的锚固材料通常采用

收稿日期: 2025-11-29

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3706702);江苏省科技成果转化专项资金计划(BA2023029)

作者简介: 王 飞,1993 年生,工程师。主要从事先进金属材料研究。Email: 982673057@qq.com

引用格式: 王飞. 桥梁缆索热铸锚用 Zn-Al-Cu 合金组织和性能研究[J]. 铸造技术, 2026, 47(9): 1019-1026.

WANG F. Research on the microstructure and properties of Zn-Al-Cu alloys for thermal casting anchors of bridge cables[J]. Foundry Technology, 2026, 47(9): 1019-1026.

Zn-2Cu 合金^[4],该合金具备较好的室温力学性能(极限抗拉强度为 110~130 MPa,伸长率为 1%~2%)和优良的铸造性能,同时制造成本低。在交通强国建设的背景下,缆索承重桥梁跨径不断突破,缆索强度的大幅提高以及其在工程应用中面临的复杂恶劣服役环境,对缆索热铸锚固体系的力学性能、耐久性及寿命稳定性的要求也越来越高,迫切需要开发适用高强缆索热铸锚的新型锌基合金。

合金元素是影响铸造锌合金组织和性能的主要因素,通过加入 Al、Cu、Mg 或稀土等合金元素,可以改善合金组织,提高力学性能、耐蚀性以及抗蠕变性能等^[5-7]。刘洪军等^[8]研究了 Al、Cu 含量对 Zn-Al-Cu-Mg 模具合金力学性能和铸造流动性的影响,当铝含量从 3%(质量分数,下同)增加到 14%,铜含量从 3%增加到 9%时,合金力学性能明显增加而铸造流动性下降。董广壮^[9]研究了铝含量(4%~10%)对锌铝合金的显微组织形貌和力学性能的影响,发现随着 Al 含量的增加,组织中的初生 β -Al 相增多,提高了锌铝合金的抗拉强度与硬度;锌铝合金中 Al 含量为 6%时,具有较佳的综合力学性能和良好的流动性。杨涤尘等^[10]研究了低 Cu 含量对 Zn-Al 合金的影响,发现 Cu 质量分数低于 1.25%时,Cu 固溶于基体相中,表现为固溶强化作用;当 Cu 质量分数高于 1.25%时,合金中会产生沿晶分布的 ϵ (CuZn₄)相,表现为第二相强化作用。韩程澄等^[11]研究了 Cu 含量对 Zn-1.2Mg-xCu(x=0、1.2 和 2.2)锌合金微观组织和力学性能的影响,结果显示:锌合金的显微硬度、抗拉强度随 Cu 含量的增加而增加,当 Cu 含量为 2.2%时,合金中出现 ϵ -CuZn₅ 金属间化合物,显微硬度、抗拉强度达到最大值,分别为 148 HV 和 227 MPa。黄海滔等^[6]探究了镧铈混合稀土对 ZnAl4 合金组织和力学性能的影响,结果表明随着镧铈混合稀土含量的增加,初生 η -Zn 相形貌由花瓣状逐步转变为球状,且分布更加均匀,片层状共晶组织得到了细化;当镧铈混合稀土质量分数为 0.15%时,合金的抗拉强度和断后伸长率最优,分别为 245.3 MPa 和 4.46%;而添加过量的稀土会使得块状、颗粒状的稀土化合物数量增加、尺寸增大,并产生偏聚,造成合金组织不均匀,导致合金力学性能下降。

近年来,Zn-Al-Cu 合金凭借优异的力学性能和铸造性能,在轴承、涡轮叶片及汽车模具等制造领域的应用日益广泛,相关的研究主要聚焦在高铝锌基合金的微观组织演变与性能调控^[12-14]。然而,作为桥梁缆索热铸锚固合金的潜在候选材料,Zn-Al-Cu 合金的针对性研究尚显不足。沈锐利等^[15]以缆索热

铸锚为对象,通过力学性能试验分析了多元锌基合金成分对合金抗拉强度、弹性模量及蠕变速率及粘结性能的影响,但未明确合金力学性能与微观组织之间的关联机制。此外,针对该合金体系在铸造流动性及耐腐蚀性能,仍缺乏系统的试验数据,限制了热铸工艺参数的优化及长期服役性能的准确评估。

基于此,本文以桥梁缆索热铸锚实际工况为导向,设计制备了中低 Al 含量的 Zn-xAl-1Cu(x=6、7、8、9,质量分数,%,下同)铸造合金,重点分析了 Al 含量对合金显微组织、力学性能、铸造流动性和耐腐蚀性能的综合影响,以期高性能缆索热铸锚用锌基合金的材料设计开发与工程应用提供关键试验数据和技术支撑。

1 实验材料与方法

1.1 合金成分设计

Al 是锌合金中添加最多的强化元素,Al 元素决定了初生相种类和数量,可通过细化晶粒与固溶强化提升合金的力学性能。缆索热铸锚要求浇铸工艺温度不超过 470 °C,避免灌锚过程中温度过高使钢丝力学性能劣化而影响缆索产品质量。因此,Al 在热铸锚用锌合金中的含量不宜过高,根据前期工艺验证结果,当 Al 含量超过 10%时,锌合金的浇铸温度会超过 500 °C,且铸件也很容易产生收缩类缺陷。此外,相关研究表明^[16-17],锌铝合金在共晶成分(Al 含量为 5%)时,合金具有最佳的铸造流动性,但是力学性能尤其冲击韧性较差。适量的 Cu 可以提高锌铝合金的力学性能和抗蠕变性能,且 Cu 元素的固溶强化效果优于第二相强化^[18];Cu 含量控制在 1%左右时合金组织、尺寸比较稳定,当 Cu 含量超过 2.5%时,会加速锌合金的“老化”,降低合金的机械性能^[5,19]。基于 Al 和 Cu 元素的作用机理,结合缆索热铸锚铸体的工艺和使用性能要求,本研究设计出 4 组 Zn-xAl-1Cu(x=6、7、8、9)合金。

1.2 合金制备

采用金属型重力铸造法制备 Zn-xAl-1Cu(x=6、7、8、9)试验合金,合金中添加微量 Mg 及稀土 RE 元素以净化熔液,提升综合性能。合金原料配制选用 0 号锌锭(99.995%)、Al-00 铝锭(99.7%)、1 号镁锭(99.95%)、Al-50Cu 和 Al-10RE 中间合金(其中 La/Ce 元素含量比值为 1:3)。合金熔炼在坩埚电阻炉中进行,熔炼温度为 620 °C,待合金完全熔化后,加入适量 ZnCl₂ 进行精炼,搅拌扒渣后静置 15 min,待合金熔液温度降至 460 °C 后浇入模温 250 °C 的金属铸模内,自然冷却后开型取件。表 1 为 5110 ICP-OES 电感

表1 合金化学成分

Tab.1 Chemical compositions of the experimental alloys (mass fraction/%)

Alloys	Al	Cu	Mg	RE	Zn
Zn-6Al-1Cu	6.26	1.05	0.025	0.022	Bal.
Zn-7Al-1Cu	7.21	1.05	0.027	0.027	Bal.
Zn-8Al-1Cu	8.13	1.02	0.027	0.022	Bal.
Zn-9Al-1Cu	9.19	0.99	0.026	0.029	Bal.

耦合等离子体发射光谱法测得试验合金实际成分。

1.3 显微组织表征和性能测试

铸态合金试样经研磨抛光后,采用体积分数为2%的硝酸酒精溶液腐蚀,在 Nikon MA100 型光学显微镜上观察显微组织。采用带有能谱仪(EDS)的 S-3700N 型扫描电镜(SEM)对合金微观组织结构、相成分及拉伸断口形貌进行分析。使用CMT5205 型电子万能试验机,按照 GB/T 228.1-2021《金属材料拉伸试验 第1部分:室温试验方法》,对合金进行室温拉伸性能测试,拉伸试样尺寸如图1所示,以3次测试数据的平均值作为合金的力学性能数据。

采用如图2所示的单螺旋型模具测试合金铸

造流动性,试样的流动长度越长,表明该合金流动性越好,充型能力也越强。合金浇铸温度为 460 ℃,模具预热温度为 200 ℃,浇铸凝固后测量试样流动长度 L ,同种合金分别进行3次流动性测试,取平均值作为合金的流动长度结果。

按照 GB/T 10125-2023《人造气氛腐蚀试验盐雾试验》对合金进行中性盐雾(neutral salt spray test, NSS)试验,试样尺寸为 30 mm×20 mm×3 mm,盐雾试验条件为:5%NaCl 溶液、腐蚀箱内温度(35±2) ℃,喷雾量(1.5±0.5) mL/(80 cm²·h),试验时间为 168 h。试验结束后,按照 GB/T 16545-2015《金属和合金的腐蚀腐蚀试样上腐蚀产物的清除》清除试样表面的腐蚀产物,通过式(1)计算合金的腐蚀速率 ν 。

$$\nu = \frac{m_1 - m_2}{At} \quad (1)$$

式中, ν 为合金失重腐蚀速率,g/(m²·h); m_1 为合金试样腐蚀前的质量,g; m_2 为合金试样腐蚀后的质量,g; A 为试样的总表面积,m²; t 为试验时间,h。

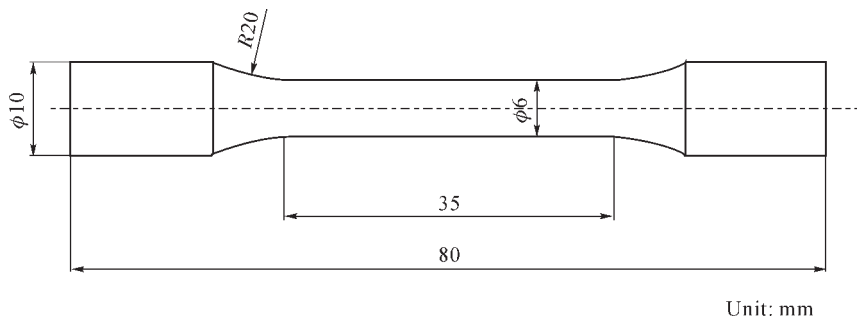


图1 拉伸试样尺寸

Fig.1 Size of the tensile sample

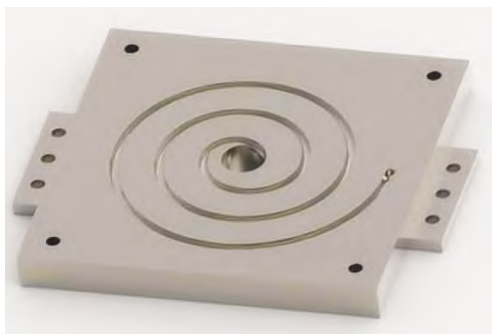


图2 螺旋流动性能测试模具示意图

Fig.2 Schematic diagram of the spiral flow performance test mold

2 实验结果及讨论

2.1 显微组织

图3为 Zn- x Al-1Cu 合金的铸态金相组织,依据铝锌二元合金相图^[20]和文献^[21]可知,合金室温组织主要由浅白色枝晶状的 α -Al 相(Zn 溶于 Al 中形成的

固溶体)和深色层片状 Zn-Al 共晶相(α -Al+ η -Zn)组成。随着 Al 含量的增加,富 Al 相的枝晶数量增多、尺寸增大,共晶组织减少;当 Al 含量为 8%时,枝晶分布均匀,当 Al 含量进一步提高时,枝晶端部开始发生粗化现象。

对合金进行 SEM 分析及元素面扫描(图4),由图可知,合金铸态组织由灰黑色 α -Al 相及其周边灰白色片层状 α -Al+ η -Zn 共晶组织构成,其中 α -Al 相的形态特征以枝晶状为主、短棒状为辅。随着 Al 含量增加到 8%时,合金中 α -Al 相数量最多,且其尺寸和分布也比较均匀(图4c),表明适量的 Al 可以改善合金铸态组织,使晶粒细化,从而提升合金的力学性能(图5)。此外,面扫描结果显示,Al 元素主要富集于 α -Al 相区域,而 Zn、Cu 元素在整个面的分布比较均匀。由此可以推断,当 Cu 含量相对较少(1%左右)时,完全固溶在合金基体中,起到固溶强化作用^[22]。

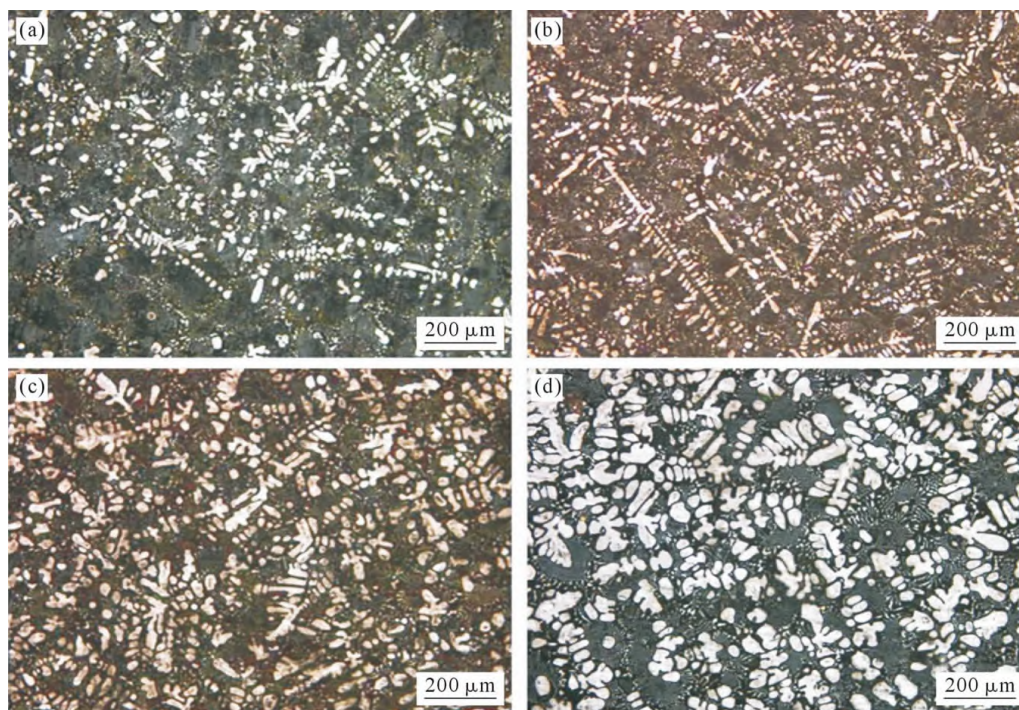


图3 Zn-xAl-1Cu 合金铸态金相组织:(a) 6%Al; (b) 7%Al; (c) 8%Al; (d) 9%Al

Fig.3 Microstructure of the as-cast Zn-xAl-1Cu alloy: (a) 6 wt.% Al; (b) 7 wt.% Al; (c) 8 wt.% Al; (d) 9 wt.% Al

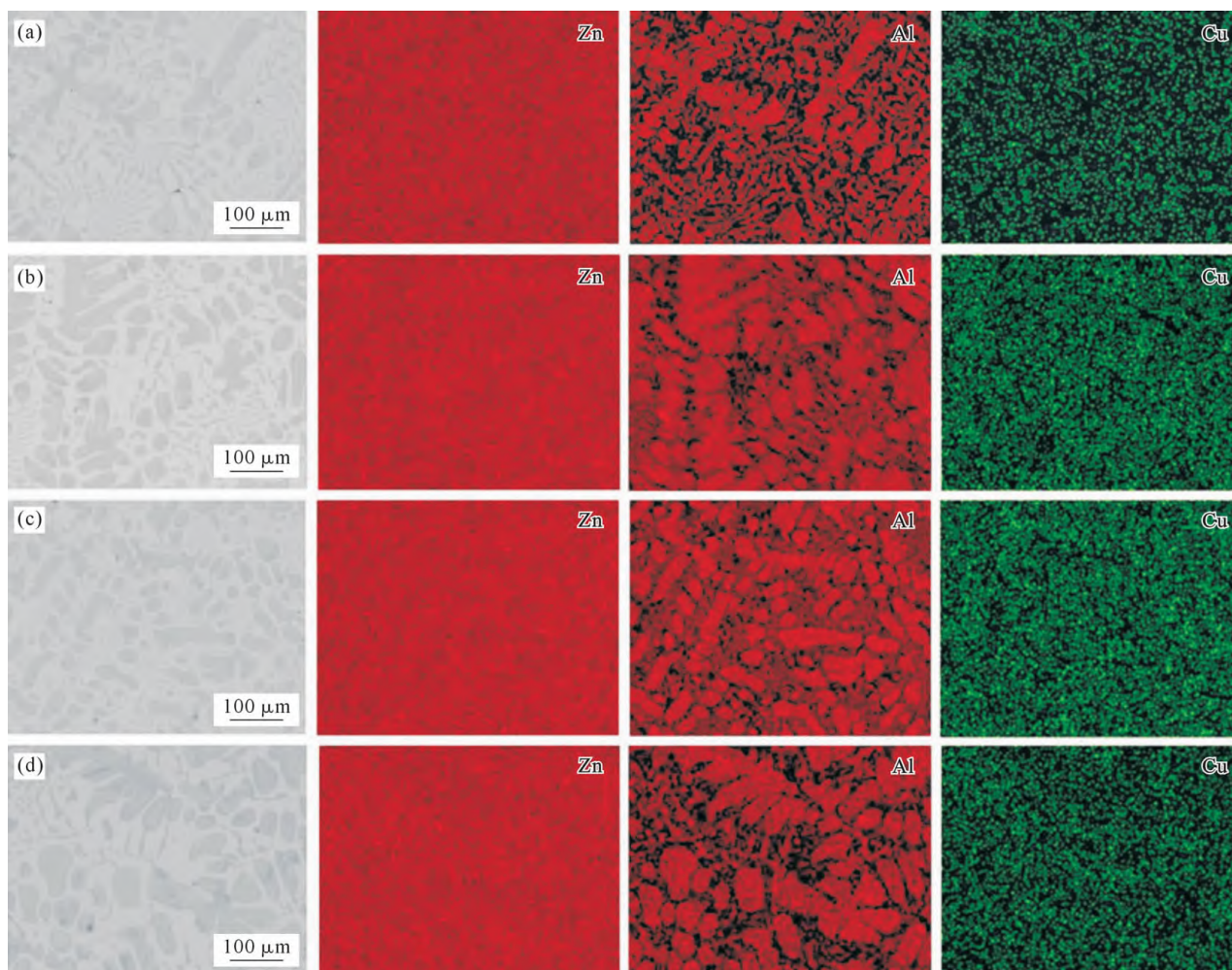


图4 Zn-xAl-1Cu 合金的 SEM 照片及元素面扫描:(a) 6%Al; (b) 7%Al; (c) 8%Al; (d) 9%Al

Fig.4 SEM images and element mapping of the as-cast Zn-xAl-1Cu alloy: (a) 6 wt.% Al; (b) 7 wt.% Al; (c) 8 wt.% Al; (d) 9 wt.% Al

2.2 拉伸性能

图 5 为 Zn-*x*Al-1Cu 合金的力学性能测试结果,可以看出,随着 Al 含量的增加,合金抗拉强度呈现先上升后小幅下降的变化规律,当 Al 含量为 8%时,合金的抗拉强度达到最大值 258 MPa;而合金的断后伸长率整体保持在 1%~2%之间,没有呈现出明显变化幅度。Al 元素对 Zn-Al-Cu 合金的强化机制^[23-24]:合金中的 α -Al 相属面心立方晶格结构,为强化相,变形过程中可有效阻碍位错的运动,抑制晶界滑移;随着 Al 含量的提高, α -Al 相增多从而提高合金的强度;但 Al 含量过量也会使 α -Al 相粗化,导致合金的力学性能下降。晶粒细化带来的强化效果遵循 Hall-Petch 关系,表示为:

$$\sigma_s = \sigma_0 + Kd^{-1/2} \quad (2)$$

式中, σ_s 为屈服强度; σ_0 为位错动力所受的晶格摩

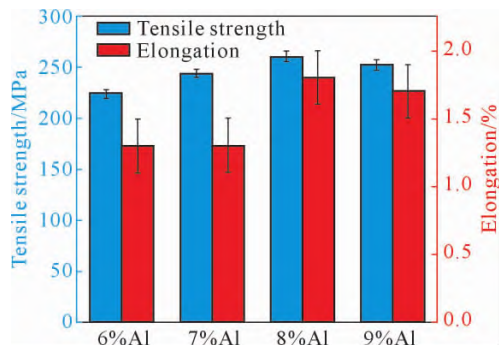


图 5 Zn-*x*Al-1Cu 合金拉伸性能
Fig.5 Tensile properties of the as-cast Zn-*x*Al-1Cu alloy

擦力; d 为平均晶粒尺寸; K 为与晶界结构有关的常数。结合图 3 和 4 及 Hall-Petch 公式(式(2))可知,合金组织中晶粒细化,晶界数量增多,变形分散在更多晶粒中进行,合金的强度得到提高;晶粒变细还可减小合金基体应力集中,降低裂纹萌生的倾向,并且晶界数量增多,对裂纹扩展阻力增加,韧性提高。因此,Zn-8Al-1Cu 合金力学性能最优,抗拉强度为 258 MPa,相比 Zn-6Al-1Cu 合金(224 MPa)提高了 15%,并且其伸长率最高(1.83%)。

Zn-*x*Al-1Cu 合金试样的拉伸断口形貌如图 6 所示。可以发现,所有断口均无明显宏观塑性变形现象,断裂机制是解理断裂。当 Al 含量为 6%时,合金断口为粗大且平整的解理面,面上分布有河流花样,表明合金在拉伸过程中,微裂纹迅速失稳,沿着晶界进行扩展并最终导致合金断裂。随着 Al 含量的增加,断口解理面数量明显增多且尺寸明显减小,同时撕裂脊增多;当 Al 含量为 8%时,局部韧窝形貌出现,表明其强塑性有所提高。这主要归因于合金中 α -Al 相数量的增多和晶粒的细化,分散了应力集中,降低了裂纹产生的概率。断口的特征变化与合金的组织 and 拉伸性能呈现良好的吻合关系。

2.3 合金流动性

合金的流动性是衡量合金铸造性能的重要指标,合金流动性越好,越有利于规避欠铸、气孔、缩松等铸造缺陷,提升缆索热铸锚铸件成型质量。图 7 为试验合金流动性能对比,可以看出,Zn-6Al-1Cu 合金的

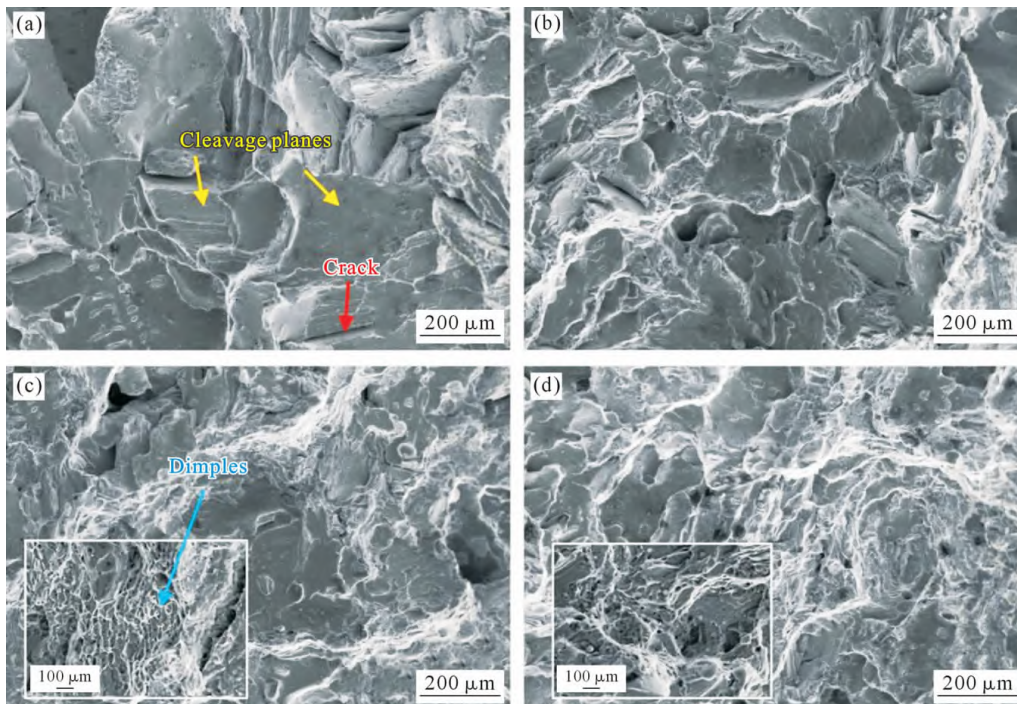


图 6 Zn-*x*Al-1Cu 合金室温拉伸断口 SEM 形貌:(a) 6%Al; (b) 7%Al; (c) 8%Al; (d) 9%Al

Fig.6 SEM morphology of the tensile fracture surface of the as-cast Zn-*x*Al-1Cu alloy: (a) 6 wt.% Al; (b) 7 wt.% Al; (c) 8 wt.% Al; (d) 9 wt.% Al

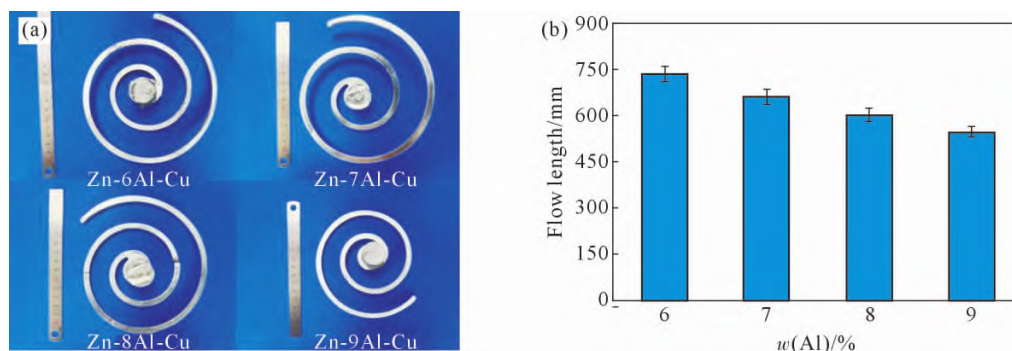


图7 Zn-xAl-1Cu 合金流动性能对比:(a) 流动性试样;(b) 合金流动长度
Fig.7 Comparison of the flow properties of the as-cast Zn-xAl-1Cu alloy: (a) flow samples; (b) flow length

流动长度最长约 73.3 cm, Zn-9Al-1Cu 合金的流动长度最短约 54.5 cm, 随着 Al 含量增加, 流动试样长度逐步减小。通常, 锌铝合金处于共晶成分(5%Al)附近时, 结晶温度区间较窄, 凝固过程更趋向于层状凝固, 对合金熔体流动的阻力小, 具有最佳的流动性。随着 Al 含量提高, 合金熔体中形成的 α -Al 枝晶就会越发达, 阻力越大, 从而降低合金熔体流动性^[9,16]。

2.4 耐腐蚀性能

图 8 为同一试验条件下 Zn-2Cu 和 Zn-xAl-1Cu 合金的失重腐蚀速率对比结果, Zn-2Cu 的腐蚀速率为 $0.297 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, Zn-xAl-1Cu 合金的腐蚀速率介于 $0.103 \sim 0.164 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 合金耐蚀性得到了明显提升。随着 Al 含量的增加, 合金腐蚀速率逐步降低, 其中 Zn-6Al-1Cu 和 Zn-9Al-1Cu 腐蚀速率分别为 0.164 和 $0.103 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 后者比前者的腐蚀质量损失速率降低了约 37%。其原因主要如下^[25-26]: 随 Al 含量升高, 富铝相逐渐增多并形成发达的树枝状枝晶网络结构, 不仅能够为合金提供有效的阴极保护, 还促进合金腐蚀产物由疏松团簇状向着致密多层网络状转变、提高保护性腐蚀产物与合金基体的附着性, 从而显著减缓合金的腐蚀。

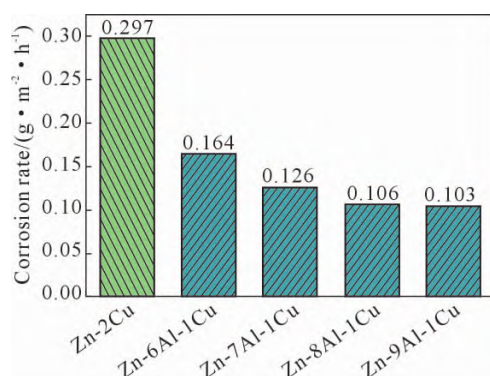


图8 Zn-xAl-1Cu 合金在 168 h NSS 试验中的腐蚀速率
Fig.8 Corrosion rates of the as-cast Zn-xAl-1Cu alloy during the 168 h NSS test

3 结论

(1) 铸造 Zn-xAl-1Cu 合金组织由初生 α -Al 相和 (α -Al+ η -Zn) 共晶相组成, Cu 元素完全固溶于合金基体中; 随着 Al 含量的不断增加, α -Al 相数量明显增加, 且分布更加均匀。Al 含量的增加促进 α -Al 相形成枝晶网络结构, 使得合金流动性呈下降趋势。

(2) Zn-xAl-1Cu 合金的断裂机制主要为脆性解理断裂, Al 元素通过固溶强化与晶粒细化作用机制改善合金的力学性能。随着 Al 含量的增加, 合金的拉伸强度呈现先上升后小幅下降的变化规律; 当 Al 含量为 8% 时, 合金的综合力学性能最优, 其室温拉伸强度和伸长率均达到最大值, 分别为 258 MPa 和 1.83%, 断口解理面明显减小且出现部分韧窝形貌。

(3) 中性盐雾腐蚀失重数据表明, Al 含量的增加提高了合金的耐腐蚀性能, Zn-6Al-1Cu 和 Zn-9Al-1Cu 腐蚀速率分别为 0.164 和 $0.103 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 后者比前者的腐蚀质量损失速率降低了约 37%。

参考文献:

- [1] HUANG W, PEI M S, LIU X D, WEI Y. Design and construction of super-long span bridges in China: Review and future perspectives [J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2020, 14: 803-838.
- [2] 王仁贵, 张靖皋长江大桥南航道桥设计创新[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2023, 53(6): 979-987.
WANG R G. Design innovation of south channel bridge of Zhangjingao Yangtze river bridge [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2023, 53(6): 979-987.
- [3] 张劲泉, 李承昌, 郑晓华, 孙晓红. 桥梁拉索与吊索[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- [4] 中华人民共和国交通运输部. 公路悬索桥设计规范: JTG/T D65-05—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway suspension bridge: JTG/T D65-05—2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [5] 王珩, 马义明, 陈海大. ZA27 合金研究综述[J]. 铸造设备与工

- 艺, 2021(6): 65-69.
- WANG H, MA Y M, CHEN H D. Review of ZA27 alloy [J]. Foundry Equipment and Technology, 2021(6): 65-69.
- [6] 黄海滔, 郭子辉, 马义明, 汪九初, 张恒华. 铜钨混合稀土对ZnAl4合金组织和力学性能的影响[J]. 上海金属, 2021, 43(3): 58-65.
- HUANG H T, GUO Z H, MA Y Y, WANG J C, ZHANG H H. Effect of La-Ce RE on microstructure and mechanical properties of ZnAl4 alloy[J]. Shanghai Metals, 2021, 43(3): 58-69.
- [7] 谷立东, 王乐耘, 应韬, 杨剑英, 李德江. 稀土 La 对铸造 Al-Si 合金组织与性能的影响[J]. 铸造技术, 2024, 45(5): 475-478.
- GU L D, WANG L Y, YING T, YANG J Y, LI D J. Effect of rare earth La on the microstructure and properties of cast Al-Si alloy[J]. Foundry Technology, 2024, 45(5): 475-478.
- [8] 刘洪军, 李亚敏, 郝远. Al、Cu 含量对 Zn-Al-Cu-Mg 合金性能的影响[J]. 铸造技术, 2007(6): 823-826.
- LIU H J, LI Y M, HAO Y. Effect of Al and Cu content on properties of Zn-Al-Cu-Mg alloy[J]. Foundry Technology, 2007(6): 823-826.
- [9] 董广壮. 低成本压铸铝合金开发研究[D]. 常州: 常州大学, 2022.
- DONG G Z. Research and development of low cost die casting zinc aluminum alloy[D]. Changzhou: Changzhou University, 2022.
- [10] 杨涤心, 高存贞, 谢敬佩, 王爱琴, 王文炎. Cu 含量对高铝锌合金组织和性能的影响[J]. 铸造技术, 2010, 31(11): 1448-1451.
- YANG D X, GAO C Z, XIE J P, WANG A Q, WANG W Y. Effects of Cu on the microstructure and properties of Zn-Al alloy[J]. Foundry Technology, 2010, 31(11): 1448-1451.
- [11] 韩程澄, 王红星, 白允强, 张宇轩, 程军权, 鲁千怡, 吴灿辉. Cu 含量对 Zn-1.2Mg 合金组织与力学性能的影响[J]. 铸造技术, 2022, 43(12): 1079-1083.
- HAN C C, WANG H X, BAI Y Q, ZHANG Y X, CHENG J Q, LU Q Y, WU C H. Effects of Cu content on the microstructure and mechanical properties of Zn-1.2Mg alloy[J]. Foundry Technology, 2022, 43(12): 1079-1083.
- [12] 王宏健, 司乃潮, 刘光磊, 王正军, 丁冉. Al 元素对 ZZn-Al-Cu 系合金组织和力学性能的影响[J]. 铸造, 2015, 64(4): 330-335.
- WANG H J, SI N C, LIU G L, WANG Z J, DING R. Effect of aluminium element on microstructures and mechanical properties of ZZn-Al-Cu casting alloy[J]. Foundry, 2015, 64(4): 330-335.
- [13] 张福男, 李现慕, 王兆文. La 对 AlSi10Cu0.2Mg0.2Mn 和 ZnAl12-Cu1(Mg)铸造合金力学性能的影响[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2015, 36(12): 1719-1723.
- ZHANG F N, LI X M, WANG Z W. Effects of rare earth La on mechanical properties of casting AlSi10Cu0.2Mg0.2Mn and ZnAl12Cu1 (Mg) alloys [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2015, 36(12): 1719-1723.
- [14] 陈明明, 刘昕怡, 祝一帆, 艾宇浩, 林高用. Cu 和 Si 质量分数对铸态 Zn-14Al 合金组织与性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(6): 2017-2027.
- CHEN M M, LIU X Y, ZHU Y F, AI H Y, LIN G Y. Effect of Cu and Si mass fraction on the microstructure and properties of as-cast Zn-14Al alloy[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(6): 2017-2027.
- [15] 沈锐利, 王路, 费汉兵, 周宁杰, 强强, 邹旭伟. 桥梁缆索热铸锚固材料及粘结性能研究[J]. 现代交通与冶金材料, 2024, 4(5): 24-28, 41.
- SHEN R L, WANG L, FEI H B, ZHOU N J, QIANG Q, ZOU X W. Study on hot cast anchoring materials and their bonding performance for bridge cables[J]. Modern Transportation and Metallurgical Materials, 2024, 4(5): 24-28, 41.
- [16] 夏昭, 孔纲, 朱林龙, 张哲成, 万聪, 车淳山, 赖德林, 万先兰. 合金元素对液相锌流动性的影响[J]. 材料保护, 2023, 56(5): 164-172.
- XIA Z, KONG G, ZHU L L, ZHANG Z C, WANG C, CHE C S, LAI D L, WAN X L. Effect of alloying elements on the fluidity of liquid-phase zinc[J]. Materials Protection, 2023, 56(5): 164-172.
- [17] 迟长志, 李世欣, 张磊. Cu、Si、Ti 对锌铝合金组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2013, 33(9): 878-880.
- CHI C Z, LI S X, ZHANG L. Effect of Cu, Si and Ti on the microstructure and properties for a zinc-aluminum alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2013, 33(9): 878-880.
- [18] 江宇, 何顺荣, 汪兴娟, 王久林, 刘伟伟, 董雄英, 宣自军. 铜对 Zn-40Al 合金组织和摩擦磨损性能的影响[J]. 铸造技术, 2013, 34(7): 797-799.
- JIANG Y, HE S R, WANG X J, WANG J L, LIU W W, DONG X Y, XUAN Z J. Influence of copper content on microstructure and performance of Zn-40Al alloys[J]. Foundry Technology, 2013, 34(7): 797-799.
- [19] 薛涛, 古文全, 于云峰, 吴健, 郭光平, 吴泽宏, 梁寅. 压铸锌合金应用研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(3): 260-264.
- XUE T, GU W Q, YU Y F, WU J, GUO G P, WU Z H, LIANG Y. Research and application development in die casting zinc alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2016, 36(3): 260-264.
- [20] 田荣璋. 锌合金[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2010.
- TIAN R Z. Zinc alloy [M]. Changsha: Central South University Press, 2010.
- [21] 王飞, 潘晟旻, 钟毅, 尹建成, 郜晓雷, 林聪, 陈业高. 卧式挤压对 ZnAl10Cu2 合金组织和性能的影响[J]. 塑性工程学报, 2019, 26(3): 161-168.
- WANG F, PAN S M, ZHONG Y, YIN J C, GAO X L, LIN C, CHEN Y G. Influence of horizontal extrusion forming on microstructure and mechanical properties of ZnAl10Cu2 alloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26(3): 161-168.
- [22] 刘赛赛, 苗华磊, 涂浩, 吴长军, 王建华, 苏旭平. Zn-11Al-2Cu-0.8Si-0.3Ti-0.05Mg 合金的拉伸蠕变行为[J]. 材料热处理学报, 2021, 42(6): 59-64.
- LIU S S, MIAO H L, TU H, WU C J, WANG J H, SU X P. Study on tensile creep behavior of Zn-11Al-2Cu-0.8Si-0.3Ti-0.05Mg alloy [J]. Transaction of Materials and Heat Treatment, 2021, 42(6): 59-64.
- [23] 邹小萍, 李德富, 郭胜利, 许晓庆, 胡捷, 贺金宇. ZnAl10Cu2 合金铸态显微结构及相结构分析[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(10): 1248-1252.
- WU X P, LI D F, GUO S L, XU X Q, HU J, HE J Y. As-cast microstructure and phase structure of ZnAl10Cu2 alloy[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(10): 1248-1252.
- [24] 王泾文. 含铝量对锌铝合金组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2014, 43(24): 40-43.

- WANG J W. Effects of Al content on microstructure and properties of Zn-Al alloy [J]. Hot Working Technology, 2014, 43 (24): 40-43.
- [25] 杨丽景,张阳明,宋振纶. 铝含量对超塑性锌铝合金腐蚀行为的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报,2012, 32(6): 491-495.
- YANG L J, ZHANG Y M, SONG Z L. Influence of aluminium content on corrosion behavior of superplastic Zn-Al alloys [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2012, 32 (6): 491-495.
- [26] 汪前雨,张丽,陆江银,魏连启,崔彦斌. 双镀锌铝合金镀层的组织结构和耐蚀性[J]. 电镀与涂饰,2020, 39(7): 392-398.
- WANG Y Q, ZHANG L, LU J Y, WEI L Q, CUI Y B. Microstructure and corrosion resistance of zinc-aluminum alloy coating prepared by a two-step hot dipping process[J]. Electroplating & Finishing, 2020, 39(7): 392-398.
- (责任编辑:宫文婧)