

逆偏析对 ZL205A 合金铸件微观组织及力学性能的影响

刘润芳 樊秀臣 王晓萌 于 森 李 明
(北京新风航天装备有限公司)

摘 要 以 ZL205A 合金壳体铸件为对象,通过研究其逆偏析区域的宏观、微观形貌及力学性能,发现此类逆偏析易产生于缝隙浇道两侧,呈线性分布,其偏析区域中 Cu 含量偏低,平均约为 4.2%;热处理后逆偏析区域硬度(HV)与其他区域相当,约为 137;抗拉强度和伸长率相比其他区域略有提升,分别为 425.3 MPa 和 7.0%。结果表明,逆偏析对 ZL205A 合金铸件本体力学性能未产生负面影响,反而有少量提升作用。

关键词 逆偏析;线性偏析;ZL205A 合金

中图分类号 TG146.21;TG249.2 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.06.022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Inverse Segregation on Microstructure and Mechanical Properties of ZL205A Alloy Castings

Liu Runfang, Fan Xiuchen, Wang Xiaomeng, Yu Miao, Li Ming
(Beijing Xinfeng Aerospace Equipment Co., Ltd.)

Abstract: The macro and micro morphologies as well as mechanical properties of ZL205A alloy shell castings in inverse segregation region were investigated. The results indicate that the inverse segregation is easily generated on both sides of the gap gate, which presents linear distribution with lower Cu content of 4.2%. After heat treatment, the hardness of alloy in the inverse segregation region is about 137 HV, which is similar to that in other regions. The tensile strength and elongation of the alloy are slightly increased compared with other regions, which are 425.3 MPa and 7.0%, respectively. The results reveal that the inverse segregation has no adverse effect on ZL205A alloy castings. Instead, mechanical properties are slightly enhanced.

Key Words: Inverse Segregation, Linear Segregation, ZL205A Alloy

ZL205A 高强度铸造铝合金在航空、航天、汽车、船舶等领域具有广泛的应用^[1-2]。由于铸造熔炼和铸造过程中存在差异,该合金易产生缩孔、缩松、夹杂、偏析等缺陷问题,影响铸件的品质,从而影响铸件的性能以及成品率。

偏析是 ZL205A 铸件中常见的缺陷,影响铸件的组织及力学性能^[3-6]。在 ZL205A 合金壳体类铸件生产中,发现了一种线性偏析缺陷,且该缺陷为逆偏析。由于此类偏析产生有较明显的规律性,因此,本研究将探讨其形成机理,并分析其对 ZL205A 合金宏观、微观形

收稿日期:2022-11-05;修改稿收到日期:2022-12-17

第一作者简介:刘润芳,女,1993 年出生,工程师,北京(100854),E-mail:1103073010@qq.com

引用格式:刘润芳,樊秀臣,王晓萌,等.逆偏析对 ZL205A 合金铸件微观组织及力学性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2023,43(6):846-849.

LIU R F, FAN X C, WANG X M, et al. Effects of inverse segregation on microstructure and mechanical properties of ZL205A alloy castings [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(6):846-849.

[11] ZHANG G P, WANG G F, YANG T H, et al. Synthesis and characterisation of TiC reinforced CoCrFeNi composite by hot-pressing sintering[J]. Materials Science and Technology, 2020, 36 (4): 409-416.

[12] ROGAL L, KALITA D, TARASEK A, et al. Effect of SiC nanoparticles on microstructure and mechanical properties of the CoCrFeMnNi high entropy alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 708: 344-352.

[13] ROGAL L, KALITA D, LITYNSKA D L. CoCrFeMnNi high entropy alloy matrix nanocomposite with addition of Al₂O₃[J]. Inter-metallics, 2017, 86: 104-109.

[14] WEI R, SUN H, CHEN C, et al. Formation of soft magnetic high entropy amorphous alloys composites containing in situ solid solution phase[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2018, 449: 63-67.

[15] XU S, ZHOU Z J, LONG F, et al. Combination of back stress strengthening and Orowan strengthening in bimodal structured Fe-9Cr-Al ODS steel with high Al addition[J]. Materials Science & Engineering, 2018, A739: 45-52.

(编辑:刘晨辉)

貌和力学性能的影响。

1 试验材料及方法

以存在偏析的 ZL205A 合金壳体铸件为研究对象，采用砂型差压铸造。首先对铸件产生偏析的位置进行 X 射线探伤，观察偏析的宏观形貌；采用华铸 CAE 软件对铸件的凝固过程进行温度场模拟，并结合实际铸造过程，对铸件产生偏析的原因进行分析；然后从铸件本体取样，取偏析部位的试样进行 T5 热处理[固溶处理： $(538\pm5)^{\circ}\text{C}\times 18\text{ h}$ ， $50\sim 80^{\circ}\text{C}$ 温水淬火；时效处理： $(155\pm5)^{\circ}\text{C}\times 8\text{ h}$ ，空冷]，通过观察偏析处的显微组织并测试偏析试样的力学性能，对拉伸后的断口进行背散射电子显微观察，观察第二相分布，分析偏析对 ZL205A 合金微观组织和力学性能的影响；针对此类偏析问题提出相应的防范措施，并通过试验验证。ZL205A 合金壳体铸件浇注系统及取样位置见图 1。

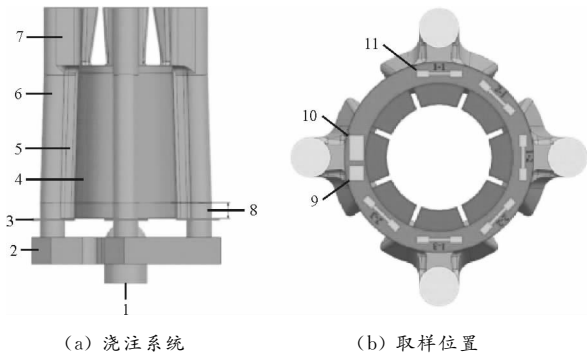
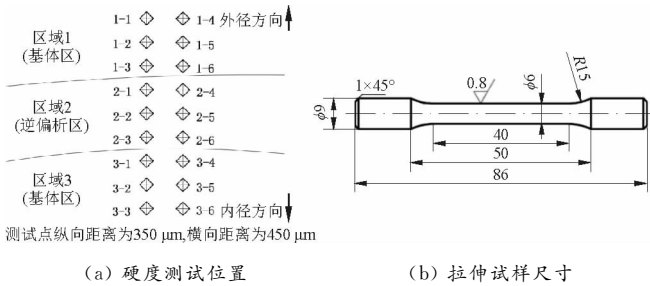


图 1 浇注系统结构及测试试样的取样位置示意图
Fig.1 Schematic diagram of gating system and sampling position of specimens
1.升液口 2.横浇道 3.过滤网 4.铸件 5.缝隙浇道 6.直浇道 7.冒口 8.底端法兰 9.扫描试样 10.硬度试样 11.拉伸试样

使用 MXR-225HP/11 型 X 射线探伤机对铸件进行探伤，观察偏析的宏观形貌；将试样采用由粗到细的砂纸磨抛到镜面，再使用 SU5000 型扫描电镜观察显微组织；使用能谱分析仪测试试样偏析位置的化学成分，确定偏析类型；采用 1000 号砂纸将试样表面打磨平整后，使用 FEM-7000 半自动显微硬度计测试其硬度（取

样位置见图 2a）；采用线切割和车床加工拉伸试样（尺寸见图 2b），并采用 MTS-810 型电子万能试验机测试试样的力学性能。



(a) 硬度测试位置 (b) 拉伸试样尺寸

图 2 硬度测试位置及拉伸试样尺寸

Fig.2 Sites for hardness test and dimension of tensile specimens

2 试验分析与讨论

2.1 宏观形貌

图 3 为 ZL205A 合金铸件产生偏析位置处的宏观形貌。其中，黑色圆点为该铸件的结构孔。可以看出，偏析为连续的近圆弧曲线状，其长度为 $60\sim 80\text{ mm}$ ，宽为 $1\sim 3\text{ mm}$ ，主要分布在缝隙浇道所对应的铸件底端法兰处，而在铸件中部及顶部均未发现此类偏析。

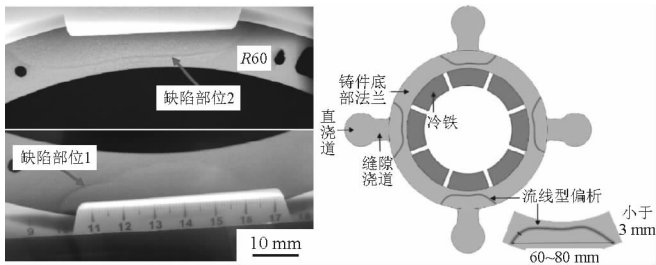


图 3 ZL205A 合金壳体铸件偏析的宏观形貌

Fig.3 Macroscopic morphology of segregation in ZL205A alloy shell castings

为了确定偏析产生的原因，对该铸件凝固过程的温度场进行了模拟，设置 ZL205A 合金固液温度区间为 $544\sim 633^{\circ}\text{C}$ ，模拟结果见图 4。可以看出，在铸件凝固初期，铸件底端法兰内径周围在冷铁激冷的作用下率先

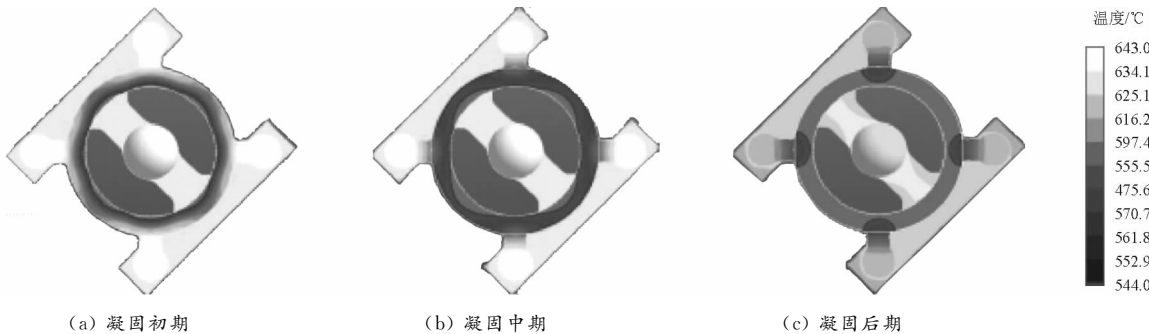


图 4 铸件底端法兰位置处凝固过程的温度场模拟结果

Fig.4 Temperature field simulation results of solidification process at flange position of casting bottom

凝固;在远离缝隙浇道且安放冷铁的部位,由内径向外径垂直方向呈正温度梯度;由于直浇道和缝隙浇道内铝液温度较高,致使缝隙浇道两侧的温度也较高。随着凝固过程进行,在铸件凝固中期,远离缝隙浇道且安放冷铁的部位按照正温度梯度顺序凝固;在缝隙浇道两侧,出现了偏析区域,该区域温度略高于固相线温度。在铸件凝固末期,出现了更明显的偏析区域,与凝固中期相比,该区域有所缩小。由此可以确定,从铸件凝固中期到铸件凝固末期,一直存在一个温度略高于固相线温度且处在缝隙浇道两侧的区域,这最终导致了偏析产生。

2.2 微观组织

偏析区域的 ZL205A 合金试样经 T5 热处理后的显微组织见图 5,虚线标识区域内为偏析区,其平均宽度为 975.4 μm。可以看出,虚线区内与区外存在明显的组织差异。虚线区内主要由 α-Al 基体组成,其中晶界上有少量弥散分布的残余 θ-CuAl₂ 相;而虚线区外则存在大量 θ-CuAl₂ 相分布于晶界位置,且相形貌较连续。

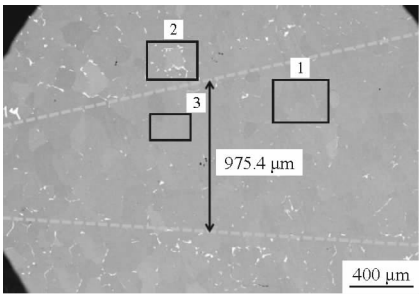


图 5 具有逆偏析的 ZL205A 合金 T5 态显微组织
Fig.5 Microstructure of ZL205A alloy in T5 state with inverse segregation

对图 5 中所标识的 3 个区域进行合金元素能谱测定,其结果见表 1。可以发现,在产生偏析区域(区域 1 和区域 3)内,Cu 含量分别为 4.27% 和 4.03%,均小于 ZL205A 合金标准 Cu 含量(4.6%~5.3%),而偏析区域外的区域 2 中 Cu 含量较高,为 5.22%,但仍处于正常范围内。由此可以推断,所产生的偏析类型为逆偏析。

表 1 各区域能谱测试结果

测试区域	Tab.1 Energy spectrum results of each region %		
	ω _B		
	Al	Cu	其他微量元素
1	89.25	4.27	余量
2	86.91	5.22	余量
3	89.45	4.03	余量

对逆偏析产生的原因进一步分析,当铝熔体充型至舱体底端法兰位置时,远离缝隙浇道且靠近冷铁的区域率先凝固,其温度低于 544 ℃,CuAl₂ 相以固态形式稳定存在;处于缝隙浇道和已凝固部位之间的小部分区域

为糊状区,温度在 544~633 ℃ 之间,该区域的 CuAl₂ 相将随着凝固过程推进,由液态逐渐转变为固态;缝隙浇道附近的区域为液态区,温度高于 633 ℃,Cu 以原子的形式存在于铝熔体中。当铝熔体继续向舱体上端充型,铝熔体温度下降速度变缓,熔体温度相对较高,导致缝隙浇道附近温度回升,使本应逐渐降温凝固的糊状区温度回升,CuAl₂ 相无法正常转变为固态,糊状区 CuAl₂ 中的 Cu 将向周围温度较高的铝熔体中扩散,使得糊状区 Cu 含量偏低,这一区域成为了共晶贫乏区,即逆偏析区,相反,糊状区周围的 Cu 含量将增加。

2.3 力学性能

对经 T5 热处理后的试样所处逆偏析位置周围进行硬度测定,其结果见图 6。可以看出,区域 1 的平均硬度(HV)为135.33,区域 2 为137.79,区域 3 为139.90,其值分布基本均匀。

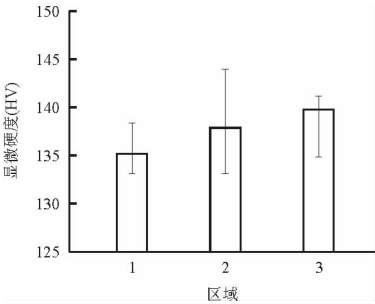


图 6 显微维氏硬度测试结果
Fig.6 Test results of microhardness

铸件底端法兰位置试样经 T5 热处理后的力学性能见图 7。试样 1~3 为含有逆偏析缺陷的试样;试样 4~6 为无偏析的正常试样。在有逆偏析的位置,其平均抗拉强度和伸长率分别为 425.3 MPa、7.0%;无偏析的正常试样的平均抗拉强度和伸长率分别为 421.8 MPa、6.4%。

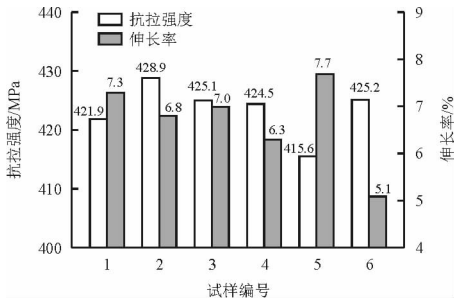


图 7 铸件底端法兰位置的力学性能
Fig.7 Mechanical properties of flange position at bottom of the castings

以上结果表明,带此类逆偏析的铸件经 T5 热处理后,逆偏析对其力学性能并未产生不利的影响,硬度(HV)基本处于总体平均值(137.67)附近,抗拉强度和伸长率相比正常位置有少量提升。结合图 5 可以说明,

逆偏析区域外存在大量的残余未溶 CuAl_2 相, 这些 CuAl_2 相极有可能损害基体, 导致合金的抗拉强度降低; 而逆偏析区域虽然为“贫铜区”, 经热处理后, “贫铜区”弥散分布了大量第二相强化相, 只存在极少量残余的 CuAl_2 相, 因此该区域的抗拉强度和伸长率相对较高。

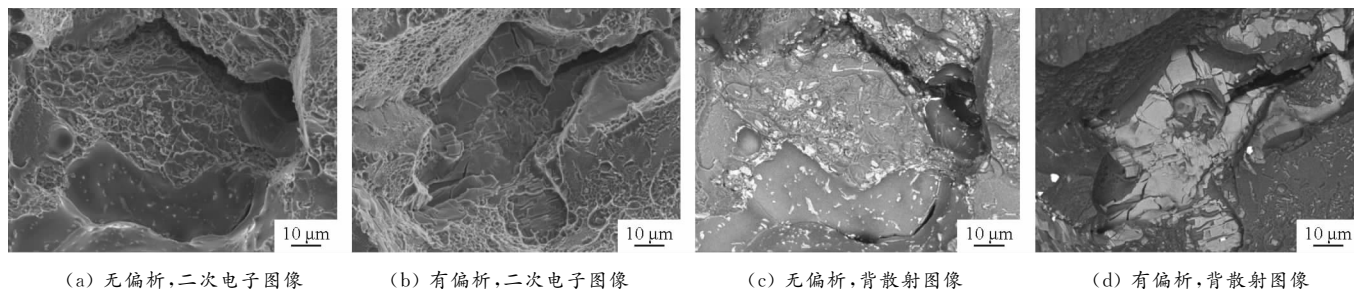


图 8 拉伸断口的微观组织

Fig.8 Microstructure of tensile fracture

3 结 论

(1) ZL205A 铸件中逆偏析呈曲线状分布于铸件底部缝隙浇道两侧, 与周围区域(Cu 含量 5.22%)相比, 逆偏析区域 Cu 含量较低, 为 4.03%, 其存在可能是由于在铸件凝固末期浇道两侧区域存在“凝固-重熔-凝固”过程, 最终形成了“共晶贫乏区”, 即逆偏析区。

(2) 热处理后, ZL205A 铸件中逆偏析区域硬度(HV)与其他区域相近, 约为 137; 室温抗拉强度和伸长率与其他区域相比略微提高, 分别为 425.3 MPa 和 7.0%, 即逆偏析未对 ZL205A 铝合金铸件本体性能产生负面影响。

参 考 文 献

- [1] 何永刚, 刘文颖, 杨振龙. 常用金属材料选用指南[J]. 世界有色金属, 2017(12): 274-276.
- [2] 贾洋江, 陈邦峰. ZL205A 高强铸造铝合金的性能及应用[J]. 轻合金加工技术, 2009, 37(11): 10-12.
- [3] 贤福超, 郭凡, 肖文丰. ZL205A 合金元素偏析行为[J]. 铸造, 2014, 63(10): 995-998.
- [4] 郑卫东, 阮磊, 厉沙沙, 等. 晶粒细化工艺对 ZL205A 合金偏析缺陷的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(7): 792-795.
- [5] 林超, 张鸿, 毕亮, 等. 铸造 Al-Cu 合金凝固缺陷研究现状[J]. 材料导报, 2016, 30(21): 143-149.
- [6] 张展飞. 高强度铸造 Al-Cu-Mn 合金的 θ 相偏析和室温性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.

(编辑: 栗万仲)

《特种铸造及有色合金》征订启事

《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、湖北省十大有影响力的自然学术期刊等。

本刊主要报道各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料成形的理论、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, 并报道各相关学科和交叉学科, 如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊接、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术研究和科技信息以及上述内容的国内外发展动向、行业活动、学术会议、消息动态等。

本刊诚征国内外广告, 业务范围: 铸造及有色合金材料、辅助材料、铸造及相关设备、铸造生产线、测控与控制设备、仪器仪表、计算机应用软件、铸造展会等。

本刊为月刊, 标准(大)16 开, 邮发代号 38-109。邮发订价每期 20 元, 全年 240 元, 如须快递, 费用另计。全国各地邮局均可订阅, 也可直接向本刊编辑部邮购, 本刊还提供过刊、压铸宝典和年会专刊邮购服务。

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

