

ZL205A 舱体铸件孤立点状缺陷的研究

周继广¹, 荣福杰², 李 笑², 王 涛², 曲银辉², 康 明²

(1. 海装武汉局驻南昌地区军事代表室, 江西南昌 330024; 2. 沈阳铸造研究所有限公司, 辽宁沈阳 110022)

摘要: 采用X射线探伤仪、光学显微镜、扫描电镜和能谱仪分析了ZL205A合金舱体铸件中所产生点状缺陷的形貌和成分, 分别在有缺陷和无缺陷的位置取样, 并进行力学性能分析。结果表明, 缺陷主要由铝合金熔炼过程中产生的KF和其吸附的重金属元素形成的多元素重金属化合物组成, 此缺陷的存在严重降低了合金的伸长率; 在熔炼时, 使用中间合金代替三氟, 并提高熔炼温度, 进行充分搅拌, 可以消除这一缺陷。

关键词: ZL205A; 点状缺陷; 微观形貌; 形成机理; 预防措施

ZL205A合金具有很好的力学性能, 抗拉强度可达500 MPa以上, 在航空航天领域应用广泛^[1]。但这种铝铜系合金的应用不及铝硅系合金, 主要原因是其铸造工艺性能较差, 合金凝固温度区间较大, 易造成各种凝固类缺陷, 如缩松、偏析、热裂等, 所以应用范围受到了较大的限制^[2-3]。

近年来, 我国航天用舱体铸件开始使用ZL205A合金, 但由于该合金成分复杂、元素多, 极易产生重金属偏析缺陷。这些偏析类缺陷在X射线底片上往往显示为白色形状。宏观上主要分为: 云雾状、团状、条状、线状和点状等。其中前四种缺陷普遍存在于应力大、厚壁和最后凝固的部位, 一般与凝固过程关系密切^[4]。而孤立的点状缺陷, 分布部位没有明显的规律, 其在凝固过程中形成的还是在熔炼过程中形成的尚未有明确结论。

本文主要研究了ZL205A合金舱体铸件中出现孤立的白色点状偏析缺陷(以下简称点状缺陷)的微观组织形貌、化学成分及对铸件力学性能的影响, 并分析了形成机理, 找出了解决措施。

1 试验方法

试验基于生产过程中ZL205A舱体铸件所产生的点状缺陷进行研究。ZL205A合金的熔炼工艺如图1所示, 熔化后的合金采用砂型低压铸造成形, 舱体为I类铸件, 经T5热处理后使用。

对生产出的舱体铸件采用X射线探伤对其进行缺陷分析, 其中点状缺陷较严重的铸件如图2所示。图中标记处表示存在点状缺陷。在舱体铸件上分别选取存在点状缺陷和不存在点状缺陷的区域, 每个区域取试样2块, 加工成 $\Phi 6$ mm的标准拉伸试棒, 对比分析其铸件力学性能。通过金相显微镜和带有能谱仪扫描电镜观察缺陷的显微组织, 分析缺陷的成分组成。

2 结果与分析

2.1 点状缺陷宏观形貌

ZL205A合金舱体铸件中常存在点状缺陷, 虽然存在缺陷的程度有轻有重, 但对铸件性能的影响不可忽视。对图2中的铸件侧壁处以及法兰处进行X射线探伤, 其宏观形貌如图3所示。从图中可以看出, 舱体铸件的侧壁处以及法兰处均存在多个径向

作者简介:

周继广(1985-), 男, 工程师, 主要从事铸造技术研究和开发工作。电话: 18179158099, E-mail: zhoujiguangwanxi@163.com

通讯作者:

李 笑, 女, 助理工程师。E-mail: limimilixiao@163.com

中图分类号: TG245

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)

09-1031-05

收稿日期:

2019-07-23 收到初稿,

2019-08-20 收到修订稿。

尺寸在2 mm左右的白色点状缺陷。根据元素在周期表位置分析,造成这种情况最可能的原因是白点处由比铝元素密度更大的元素组成^[5]。

2.2 点状缺陷对力学性能的影响

分别对上述ZL205A合金舱体铸件点状缺陷比较严重的区域和无缺陷区域取样进行力学性能测试,其抗拉强度 R_m 、屈服强度 $R_{p0.2}$ 和伸长率 A 测试结果如表1所示。从表1中可以看出,有缺陷区域试样的抗拉强度明显低于无缺陷区域的,即使在点状缺陷区域,其抗拉强度也能达到389 MPa,高于本项目舱体铸件要求的374 MPa,可满足铸件使用要求。但对比伸长率可以看出,含有点状缺陷的区域伸长率发生了大幅度的降低,最低值只有0.5%,远低于舱体铸件要求的最低伸长率3.5%。含有点状缺陷区域的 $R_{p0.2}$ 值也下降了,说明

这些点状缺陷对铸件的整体力学性能影响较大。

通过上述分析,可以看出ZL205A合金舱体铸件存在点状缺陷区域材料的 R_m 、 $R_{p0.2}$ 和 A 都发生了降低,点状缺陷对铸件的力学性能产生明显的降低作用。

2.3 点状缺陷的微观组织及化学成分

采用金相显微镜对含有点状缺陷的试样进行观察,其微观组织如图4所示。从图中可以看出,在灰白色基体上分布着黑色似“孔洞”般的组织,并且周围围绕着灰黑色的相,这种组织即为点状缺陷。

使用扫描电镜对点状缺陷进行进一步观察分析,如图5a所示。从图中可以看出,图4中的黑色“孔洞”在扫描电镜下为亮白色颗粒,对其进行放大如图5b所示,可以看出颗粒呈现出规则球型,径向尺寸约为0.3 μm 。

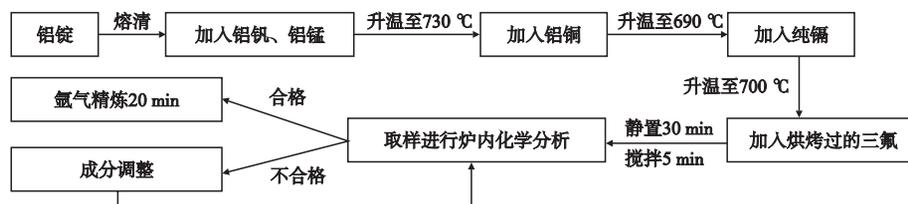


图1 ZL205A合金熔炼工艺

Fig. 1 Melting process of ZL205A alloy

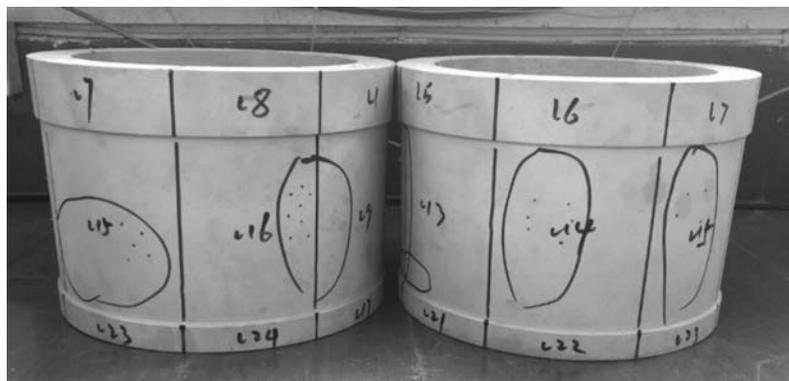
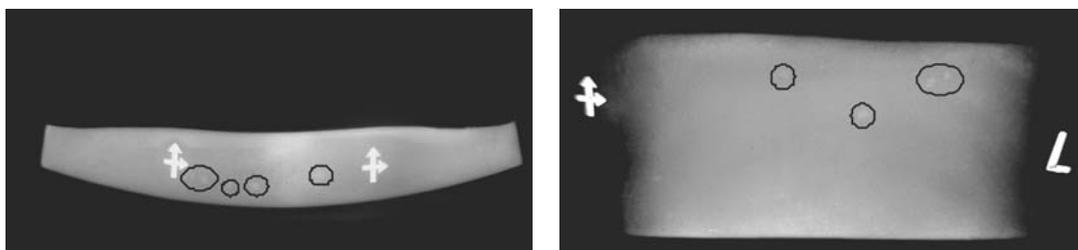


图2 舱体铸件

Fig. 2 Cabin castings produced by low pressure casting



(a) 侧壁处探伤片

(b) 法兰处探伤片

图3 ZL205A合金点状缺陷宏观形貌

Fig. 3 Macroscopic appearances of punctate defects in ZL205A cabin castings by X-ray radiography

对图5b内组织进行成分分析结果如图6所示。从图中可以看出，谱图4、5中主要以Al、F、K三种元素为主，F元素和K元素主要来源于铝合金熔炼时加入三氟作为细化剂，三氟内含有 K_2ZrF_6 、 K_2TiF_6 、 KBF_4 ，它们与铝液发生反应^[6-8]：



反应生成了KF、 AlF_3 ，故谱图4、5中组织主要为KF、 AlF_3 。谱图6、7中主要含有Al、F、K、Cu、Zr元素，氟盐与铝液发生反应时还生成反应物 Al_3Zr 和 AlB_2 ，这两种金属间化合物可以起到细化晶粒的作用，而Cu元素来源于Al-Cu中间合金，在凝固过程中Cu元素不能完全融入 α (Al)中，大部分Cu元素与Al元素反应生成了 Al_2Cu 金属间化合物。谱图8位置应为 α (Al)基体，主要以Al、Cu元素为主。谱图9中主要含有Al、Ti、Mn、Cu、Zr元素，应为重金属元素形成的金属间复合物。

对围绕在“孔洞”周围似花团簇般的组织进行成分分析，结果如图7所示。从图中可以看出，谱图10、11中主要含有Al、Ti、Cu三种元素，Ti元素主要来源于 K_2TiF_6 与铝液发生反应生成的 Al_3Ti 金属间化合物。

通过上述元素分析可以得出，点状缺陷主要是由 Al_3Ti 、 Al_2Cu 以及Cu、V、Zr、Mn等重金属元素组成的重金属复合物组成的，点状缺陷内的“孔洞”主要是由KF造成的。从点状缺陷的宏观和微观形貌观察，以及形成“孔洞”的成分，可以判断点状缺陷产生在铸件浇注之前，即点状缺陷是在金属液熔炼过程中产生的，同时在凝固过程中，Cu、V、Zr、Mn等重金属元素向其中扩散，形成缺陷孔洞，因此可以说，白色点状缺陷为一种夹杂物。

2.4 点状缺陷产生原因及防止措施

在熔炼过程中铝液内存在KF相，其密度较小，重金属化合物和元素极易聚集在KF上长大，形成聚集物。该聚集物总密度与金属液密度相差无几，所以悬浮在液体中，不会下沉到坩埚底部，在铸件浇注时随液流进入升液管后进入铸件型腔。最终造成了铸件内部存在白色点状缺陷，并且缺陷位置不固定、无规律。

表1 ZL205A合金点状缺陷区域和无缺陷区域力学性能
Table 1 Mechanical properties in zones with and without punctate segregation defects

试棒编号	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A/%	备注
1	405	357	12.5	1#法兰无缺陷区域
2	453	380	13.5	2#法兰无缺陷区域
3	389	320	0.5	3#法兰有缺陷区域
4	399	323	0.5	4#法兰有缺陷区域
5	423	369	7.0	5#侧壁无缺陷区域
6	436	372	7.5	6#侧壁无缺陷区域
7	388	321	1.0	7#侧壁有缺陷区域
8	389	322	3.0	8#侧壁有缺陷区域

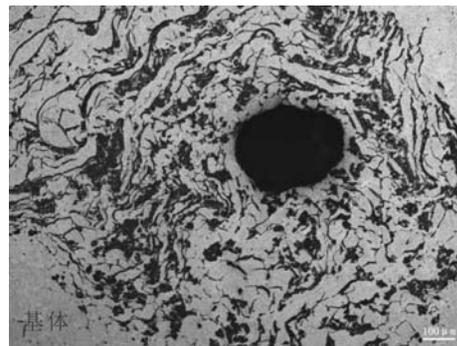
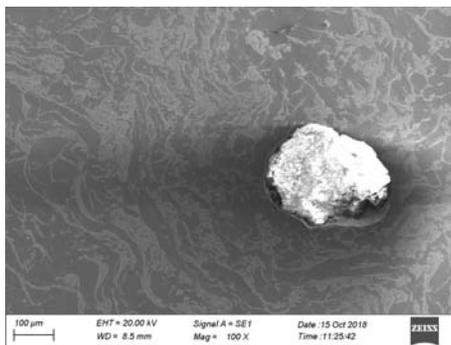
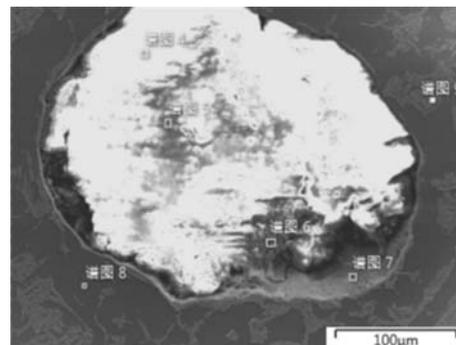


图4 ZL205A合金点状缺陷组织金相显微照片
Fig. 4 Microstructure in a punctate defect-containing zone



(a) 点状缺陷SEM照片



(b) 成分分析点位置

图5 ZL205A合金点状缺陷组织扫描电子照片

Fig. 5 SEM images in a punctate defect-containing zone

针对舱体铸件内部含有白色点状缺陷，提出了以下解决措施。

(1) KF是熔炼时加入三氟反应生成的中间产物，不加入三氟，可以排除KF与重金属相吸附的机会，这样铝液内不会有KF生成，通过加入中间合金代替三氟，减少此类缺陷的生成。

(2) 更改熔炼工艺，如图8所示。使高熔点难溶解的金属充分溶解，减少在合金液中的集聚，在熔炼操作时提高熔炼温度，充分搅拌，使金属液体成分均匀，减少熔炼后金属液静止保温时间，防止重金属复合物聚集长大。

通过采取上述措施，生产了8件ZL205A合金舱体

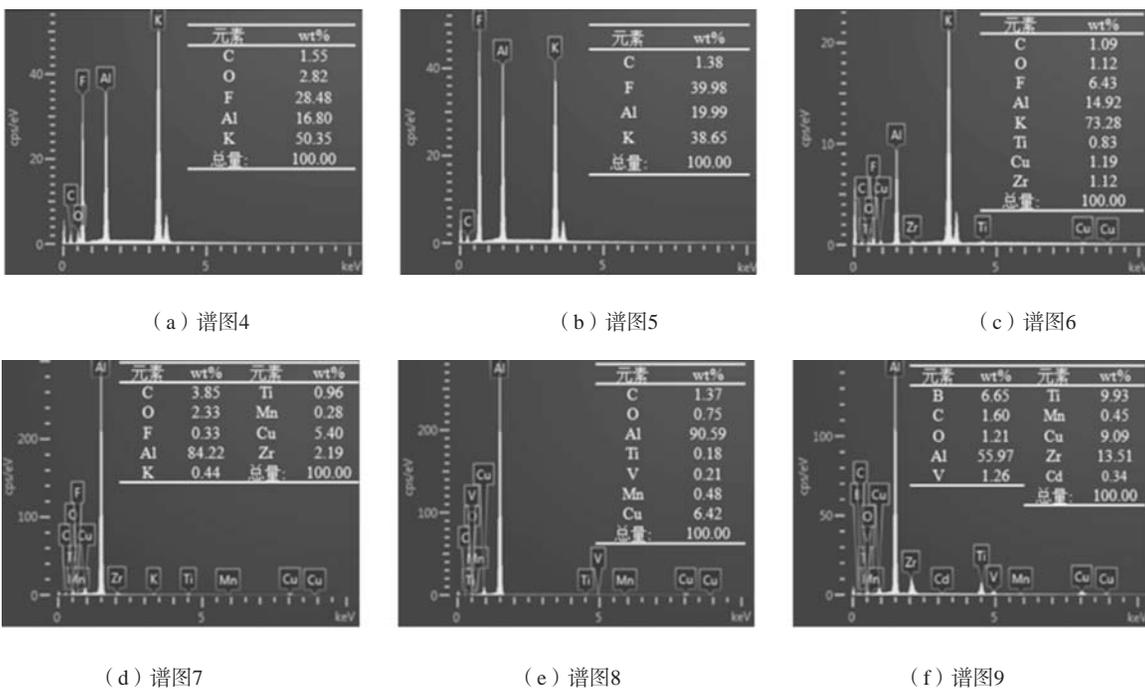


图6 图5b中“孔洞”及附近组织成分分析结果

Fig. 6 Composition analysis results within “hole” and in near-“hole” zone in Fig. 5b

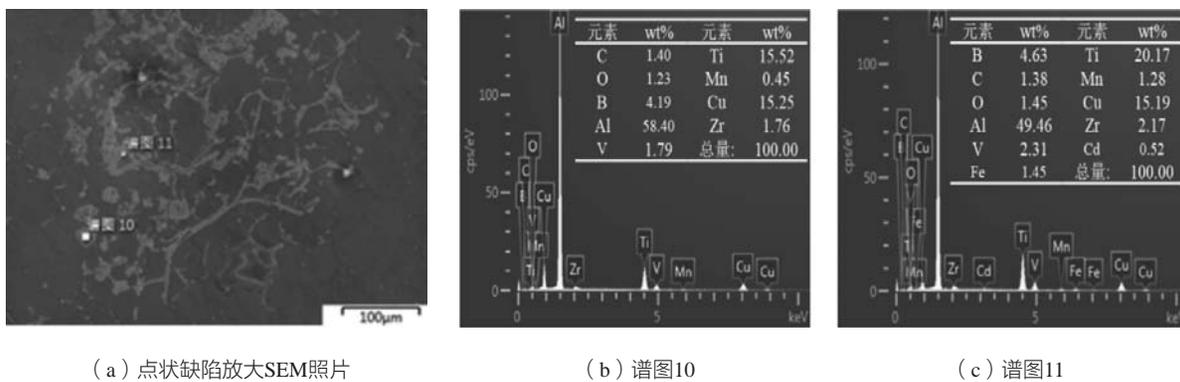


图7 点状缺陷周围组织成分分析

Fig. 7 Composition analysis results in the near zone of punctate defect

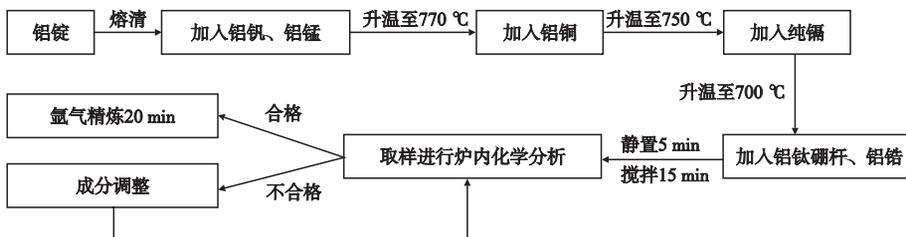


图8 更改后ZL205A合金熔炼工艺

Fig. 8 Modified melting process for ZL205A alloy

铸件,如图9所示,铸件经过X射线探伤后无点状缺陷存在,并且试棒的力学性能符合检查验收标准,铸件合格率大幅度提升。

3 结论

(1) ZL205A合金点状缺陷会降低铸件力学性能,特别是大大降低伸长率。

(2) ZL205A合金点状缺陷组织主要由KF和重金属复合物组成,其中主要含有元素为Al、Ti、Cu、V、Zr元素,主要相为 Al_3Ti 和 Al_2Cu 。缺陷的产生与浇注过程无关,主要产生于熔炼过程。

(3) 为防止产生点状缺陷,在熔炼时使用中间合金代替三氟,提高熔炼温度,多次充分进行搅拌,并减少金属液保温静止时间,通过此种方法可有效减少ZL205A合金舱体铸件中白色点状缺陷。



图9 无缺陷舱体铸件
Fig. 9 Defect free cabin castings

参考文献:

- [1] 王荣,李建彬,高映民. ZL205A铝合金铸造工艺研究[J]. 铸造技术, 2019, 40(2): 82-83.
- [2] 迟秀梅,张娜,何凯,等. ZL205A支架铸造工艺研究[J]. 铸造设备与工艺, 2017(1): 13-15, 36.
- [3] 王松涛,赵忠兴,田庆海,等. ZL205A合金热处理工艺研究[J]. 热加工工艺, 2005(5): 39-40.
- [4] 邵冲,尹法杰,郑宗文,等. 熔模铸造ZL205A铸件偏析形成机理及解决措施[J]. 特种铸造及有色合金, 2016(8): 841-843.
- [5] 李玉胜,翟虎,马宝民,等. 高强度ZL205A合金大型铸件“白点”偏析研究[J]. 铸造, 2007, 56(2): 185-191.
- [6] 管仁国,康立文,尚剑洪,等. 倾斜式冷却剪切流变对半固态合金组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2005, 25(z1): 233-237.
- [7] YÜCEL Birol. Production of Al-Ti-B grain refining master alloys from B_2O_3 and K_2TiF_6 [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2007, 443(1-2): 94-98.
- [8] 赵建新,朱鸣芳,金宰民,等. Al-Si合金在凝固过程中颗粒和枝晶组织的演变[J]. 理化检验: 物理分册, 2004(9): 433-438.

Study on Isolated Punctate Defects in ZL205A Cabin Castings

ZHOU Ji-guang¹, RONG Fu-jie², LI Xiao², WANG Tao², QU Yin-hui², KANG Ming²

(1. Wuhan Navel Equipment Department Representative Office in Nanchang Area, Nanchang 320024, Jiangxi, China; 2. Shenyang Research Institute of Foundry, Shenyang 110022, Liaoning, China)

Abstract:

The morphology and composition of the isolated punctate defects, a kind of very harmful segregation defect, occurring in ZL205A alloy cabin castings were analyzed by X-ray industrial radiography, optical microscope, scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS). After sampling from the defect-containing zones and defect-free zones, the mechanical properties of the samples were analyzed. The results show that the defects are mainly composed of KF produced in the melting process of aluminum alloy and multi-element heavy metal compounds formed by the adsorption of heavy metal elements, which seriously reduces the extensibility of the alloy. The defects can be eliminated by using a master alloy instead of trifluoride, increasing melting temperature and stirring frequency.

Key words:

ZL205A; punctate defect; morphology; formation mechanism; preventive measures