

熔炼工艺对 ZL114A 铝合金铸件焊接性能的影响

侯继伟¹ 魏芳¹ 朱克宁² 侯敏¹ 周耀忠¹

(1. 北京星航机电装备有限公司, 北京 100074; 2. 空军驻京西地区军事代表室, 北京 100074)



摘要: 通过试验分析了熔炼工艺对 ZL114A 铝合金铸件焊接性能的影响, 结果表明, 活性元素镁、锶、钛会使熔液大量吸气, 焊接时气孔缺陷倾向增加; 使用 AlTi4B 可细化 α 初生相晶粒, 缩小枝晶间孔隙, 减轻焊接时气孔缺陷倾向; 氩气精炼能有效去除合金熔液中的气和渣的含量, 提高焊接质量; 精炼后静置时间延长会使氢透过氧化膜向熔体内扩散, 增加了合金液的气体含量, 最终恶化焊接性能。

关键词: ZL114A 合金; 熔炼工艺; 焊接性能

Influence of Melting Process on Welding Property about ZL114A Aluminum Alloy Casting

Hou Jiwei¹ Wei Fang¹ Zhu Kening² Hou Min¹ Zhou Yaozhong¹

(1. Beijing Xinhang Mechanics & Electricity Equipment Co. Ltd., Beijing 100074;

2. The Air Force Military Representative Office in Beijing West, Beijing 100074)

Abstract: The influence of melting process on welding property was analyzed by experiments about ZL114A aluminum alloy casting. The results show that active elements of Mg, Sr and Ti caused melting liquid absorb mass gases, and the orientation of gas hole increased during welding. The primary α grain size fined and the hole between dendrite shrank by using AlTi4B, accordingly the orientation of gas hole decreased. The impurity amount and gas content was wiped off effectively by argon purification, and the welding quality was increased. The gas content increased and the welding quality exacerbated finally while the hydrogen drilled through alumina film and diffused into melting liquid with holding time elongation.

Key words: ZL114A alloy; melting process; welding property

1 引言

ZL114A 是航天领域应用最为广泛的一种 Al-Si 系铸造合金材料, 是仿美 A357 合金, 采用该合金研制的铸件焊接时, 常易产生气孔缺陷。大量生产实践证明, 采用相同的焊接工艺对不同熔炼工艺生产的铸件进行焊接时, 焊接合格率会有显著差异, 即焊缝质量不仅与焊接工艺有关, 也与铸件成形过程中的熔炼工艺关系密切。本文从熔炼的角度分析铸件的焊接性能, 以期采取对症措施, 提高铸件焊接合格率, 服务于生产。

2 ZL114A 铝合金铸件焊接气孔缺陷原因分析

生产中 ZL114A 铝合金铸件焊接时产生的主要缺陷是气孔缺陷, 约占全部焊接缺陷的 60% 以上, 有时呈现密集分布。为提高焊接合格率, 气孔缺陷是首先要解决的问题。由于采用真空电子束焊接, 焊接过程中侵入性气孔产生的可能性小, 因此分析气体的来源, 主要有两方面, 一是合金中固有气体。氢是铝合金中气体的主要来源, 固态铝中几乎不溶解氢, 氢主要溶解在液态铝中, 且随温度的升高, 溶解度增大。据文献[1]介绍, 每 100g 熔融铝中氢溶解量大约为

0.10~0.40mL。铸造过程中，当熔融金属液浇注进入铸型型腔时，金属液受铸型激冷瞬间凝固，固溶于熔液中的氢来不及析出，致使焊接时气体重新析出，造成气孔缺陷。“寄生机制^[2]”认为杂渣附着着气体，因此，有气必有渣，这就是焊接过程中容易产生气孔的部位也容易泛渣的原因。二是焊接部位合金基体组织晶粒粗大，焊接重熔不能改善晶粒尺寸，焊接后重熔区凝固时，树枝晶组织相互交叉搭接，致使枝晶间隔绝的金属液收缩出现的体积亏损未能得到合金液有效补缩出现的分散状收缩缺陷，表现为孔洞类缺陷或收缩性气孔缺陷。基于上述两方面原因，从铸造过程的熔炼环节入手，进一步分析导致气体含量增加和晶粒粗化的详细原因。

3 试验方法

为找出导致 ZL114A 铝合金熔炼过程气体含量增加和晶粒粗化的原因，试验过程采用当量仪（VAC-TEST-SYSTEM）检测化学成分对合金含气量的影响，通过对比常压下凝固的样品与 80mbar 压力下凝固的样品密度，鉴定密度当量值（DI），从而检测合金潜在的不致密度，反映气体含量变化情况。

原理为： $DI = (\text{常压下密度} - \text{负压下密度}) / \text{常压下密度} \times 100$ 。

DI 值越高，表明致密度越差；DI 值越低，表明熔液的致密度越高，越纯净。

为分析精炼剂和细化剂对合金晶粒的影响，设计了三种试验方案，见表 1。三种试验所得的显微组织通过光学显微镜检测。

表 1 三种试验的细化剂、变质剂情况

	试验 1	试验 2	试验 3
细化剂	铝钛	铝钛	铝钛硼
变质剂	铝锆	钠盐	

4 试验结果及分析

4.1 ZL114A 铝合金熔炼过程气体含量的变化及原因分析

将铝锭以及 AlSi12A 中间合金熔化浇注试样 1，见图 1。试样 1 中仅含铝和硅两种元素，对比图 1a、图 1b 试样表面，无明显差别，这表明原材料气、渣含量较低，此时测定密度当量为 0.9DI，可见硅能降低氢在铝熔体中的溶解度。

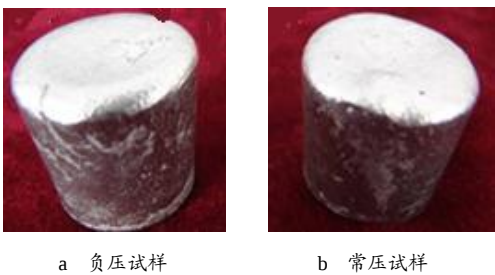


图 1 试样 1

在温度 730℃时，往试样 1 合金液中加入细化剂 AlTi5A 中间合金，待其熔尽，搅拌 5min，浇注试样 2，见图 2。由图 2 可明显看出负压下凝固的试样表面存在孔洞，表明合金熔液中气体或杂渣含量增大，致密度较低，测定密度当量为 13.4DI。经过分析认为：由于钛和空气中的氢、氮、氧元素都有极强的亲和力，且活泼元素钛在 400℃以上会大量吸氢，使得密度当量增大。

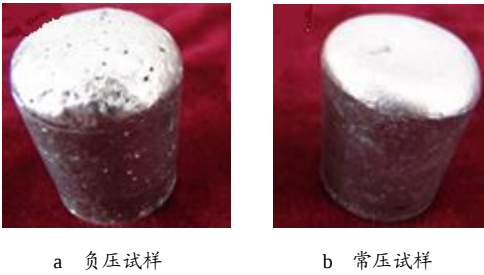


图 2 试样 2

在温度 705℃时，往试样 2 合金液中加入镁锭，熔尽后充分搅拌，浇注试样 3，见图 3。在图 3 中负压凝固的试块布满了气孔，密度当量增大到 23.5DI。这是由于镁元素较为活泼，破坏了合金熔液表面对合金熔液起保护作用的致密度较高的氧化层，氧化层被破坏后，熔体大量吸入了水蒸气，使得含气量增大，从而密度当量变大。

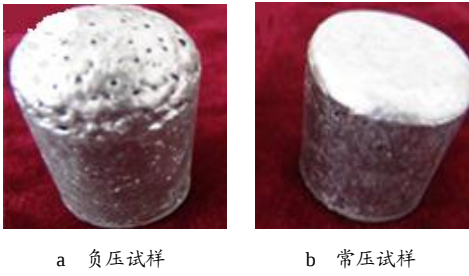


图 3 试样 3

温度 706℃时，加变质剂 AlSr5A，待熔尽后充分搅拌，浇注试样 4，见图 4。在图 4 中负压下凝固的

试块布满了气坑，含气量极多，测定其密度当量进一步增加到 25.2DI。由于锶为活泼元素，易与氧和水分发生反应，影响液面氧化膜结构，熔体处于不稳定状态，导致熔体吸氢加重^[3]。



a 负压试样 b 常压试样

图 4 试样 4



a 负压试样 b 常压试样

图 5 试样 5



a 负压试样 b 常压试样

图 6 试样 6

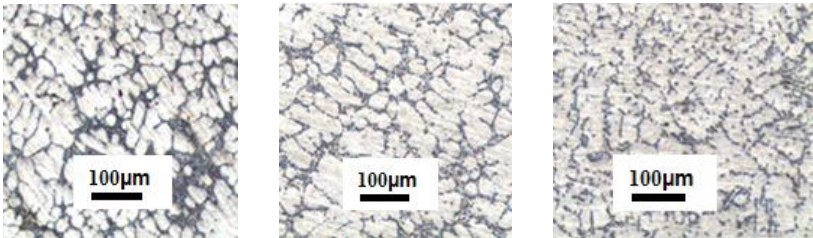
温度 683℃时，IDECO 铝合金旋转净化系统（Metal-Clean）旋转喷吹氩气 18min，静置 5min 后浇注试样 5，见图 5。经过观察常压及负压下凝固试样

表面，试样的外观没有太大差别，说明旋转喷吹有效降低了合金熔液中的气渣含量，测得密度当量为 1.7DI。经过测定，合金液静置 15min 内，含气量增加不明显，超过 15min，含气量又会继续增加。当静置 30min 后浇注试样 6，见图 6。负压凝固的试样表面出现孔洞，说明合金液随着时间的增加，含气量增加，此时测得合金液密度当量 3.6DI。由于液面氧化膜吸附水和吸潮的特性显现出来，且氢原子比氧原子小，可以透过表层氧化膜向熔体内扩散，使得氧化膜起着氢向熔液中传递触媒的作用，增大了合金液中的气体含量。

综合上述试验过程及结果，ZL114A 合金熔炼过程中活泼的合金元素使得合金熔液大量吸气，降低合金液密度；氩气旋转喷吹可有效去除合金液中的气和渣，提高合金液密度，但随着静置时间的延长，合金液呈吸气量增加趋势。

4.2 熔炼工艺对晶粒大小的影响

采用表 1 中三种试验方案进行合金熔炼，浇注后进行光学显微组织观察，结果见图 7。在图 7 中，铝固溶体初生相生长为明显的树枝状，晶间各初生相及共晶相硅呈细小的粒状、棒状，并聚集生长。试验 3 的合金采用 AlTi4B 细化剂，初生铝固溶体晶粒最小。试验 1 和试验 2 均采用 AlTi 细化剂，合金中初生铝固溶体晶粒相比较为粗大，且由于初生枝晶组织粗大，存在枝晶间收缩性孔洞类缺陷。同样采用 AlTi 细化剂的试验 1 和试验 2，采用钠变质的试验 2 中树枝晶（图 7b）比采用锶变质的试验 1（图 7a）更为粗大，这是因为锶的加入会导致 α （Al）枝晶数量增加^[4, 5]。从图 7a 中也可以看出，孔洞缺陷明显多于图 7b 和图 7c，这与锶致使合金液大量吸气后除气效果不佳有关。



a 实验 1 b 实验 2 c 实验 3

图 7 三个实验的 ZL114A 合金组织

4.3 ZL114A 合金焊接试验结果

按照表 1 中三种试验方案进行合金熔炼。由于 ZL114A 合金中活性元素主要有镁、钛、锶、钠，因

此将活性元素在精铝锭、铝硅中间合金完全熔化后，除气精炼前加入。采用 IDECO 铝合金旋转净化系统除气 18min、静置 15min 后分别浇注焊接试片，试验

3 的焊接质量最好,其次是试验 1 和试验 2;静置 30min 后分别浇注焊接试片,仍然是试验 3 的焊接质量最好,其次是试验 2 和试验 1,这与铈吸气倾向严重有关。

根据上述焊接试验结果,采用试验方案 3 熔炼合金,并合理设置活性元素添加次序,采取有效的除气精炼工艺进行铸件浇注。铸件组焊时,焊接合格率明显提高,取得了良好的效果。

5 结束语

a. ZL114A 合金熔炼过程中,加入活性元素钠、镁、铈、钛后,会使熔液大量吸气,使焊缝产生气孔缺陷倾向增加。

b. 用 AlTi4B 细化剂,可使初生铝固溶体晶粒细小,减小枝晶间孔洞缺陷,优化焊缝质量。

c. 通过氩气旋转喷吹精炼,能有效地去除合金熔液中的气和渣,提高合金纯净度,进而提高合金冶金

质量,优化焊接性能。

d. 氩气旋转喷吹精炼后短时静置,可使合金液中的气、渣浮到液面,达到净化合金液的目的,但长时间静置会使氢透过氧化膜向熔体内扩散,增大了合金液的气体含量。

参考文献

- 1 疏达,孙宝德,王俊等.铸造铝合金洁净度-性能关系[J].特种铸造及有色合金,1999(2): 52
- 2 傅高升,陈文哲,陈鸿玲,等.铝熔体高效净化的理论及净化处理技术的现状分析[J].机电技术,2003(B09): 221
- 3 欧阳志英,毛协民,红梅. Sr 和稀土对铝合金表面氧化膜保护效果的影响[J].铸造,2006, 55(10): 1071
- 4 柳秉毅.铝硅合金加铈变质的研究与实践[J].南京机械高等专科学校学报,2000, 5(2): 47
- 5 廖恒成,丁毅,孙国雄.铈变质近共晶 Al-Si 合金力学性能与枝晶 α -Al 特征参数的相关性[J].铸造,2002, 51(9): 541

(上接第 35 页)

4 结束语

a. 双重退火态 TC11 钛合金组织为等轴的 α 相和 β 转相的双态组织,在热旋压作用下,组织呈纤维状,带有一定的方向性, α 相晶粒择优取向由 (101) 晶面向 (002) 晶面转变, β 相被次生 α 相隔断,呈不连续形貌,基体组织为 α 相。

b. TC11 钛合金在热旋压变形作用下,硬度和强度都得到了明显的提高,洛氏硬度提高了 27%,强度达到了 1200MPa,断后伸长率由 16.5%降到 10.5%。

c. TC11 钛合金热旋压后的基体组织中弥散分布着次生 α 相以及少量的 $\text{Si}_3\text{Ti}_2\text{Zr}$ 颗粒物, β 相中有小长宽比的 α 相柱条,热旋压变形后的这种微观组织形貌,使 TC11 钛合金在宏观上表现出强度、塑性良好的综合力学性能。

参考文献

- 1 李晓芹.锻造加热温度对 TC11 合金组织性能的影响[J].热加工工艺,1999(3): 30~32
- 2 Li Miaoquan, Liu Xuemei, Xiong Aiming. Prediction of the mechanical properties of forged TC11 titanium alloy by ANN[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 121(1): 1~4
- 3 Boyer R R. An overview on the use of titanium in the aero-space industry[J]. Mater. Sci. Eng. A, 1996, 213: 103~114
- 4 史科,单德彬,吕炎. TC11 合金高温变形行为及其机理[J].宇航材料工艺,2008(2): 52~56
- 5 徐文臣,单德彬,陈宇,等.钛合金薄壁筒形件热旋成形技术研究[J].锻压技术,2008, 33(3): 56~59
- 6 黄伯云,李成功,石力开,等.有色金属材料手册[M].北京:化学工业出版社,2009.606~607
- 7 赵宪明,吴迪,吕炎,等.筒形件正旋压力及位移分布规律的有限元分析[J].塑性工程学报,2002, 7(4): 56~59
- 8 张明.热处理对 TC21 钛合金组织和性能的影响[D].西安:西北工业大学,2004