DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2022.10.011

# 铸件壁厚对 ZL205A 合金组织和性能的影响

杨 玲<sup>1</sup>,高艳丽<sup>1,2</sup>,郝慧林<sup>1,2</sup>,刘崇证<sup>1,2</sup>,潘俊杰<sup>1,2</sup>,刘闪光<sup>1,2</sup>,王海龙<sup>1,2</sup> (1. 中国航发北京航空材料研究院 北京 100095 ;2. 北京市先进铝合金材料及应用工程技术研究中心 北京 100095)

摘 要:本文以 ZL205A 合金为研究对象,采用 OM、SEM、TEM 对铸件组织进行分析,研究了不同壁厚对铸件显微 组织和力学性能的影响。结果表明,随着铸件壁厚增加,ZL205A 合金冷却速率不断降低,导致合金晶粒尺寸增加。晶粒 尺寸的增加,导致铸态条件下,合金的抗拉强度和伸长率随冷却速度的降低而降低,同时由于退火效应存在,屈服强度 随冷却速率的降低略有增加。不同冷却速率的铸件经固溶淬火处理后,晶界的共晶组织几乎完全固溶于晶内,当冷却速 率为 7.4 K/s 和 2.0 K/s 时,铸件的析出相密度和尺寸接近;当冷却速率为 0.5 K/s 时,铸件析出相密度降低,尺寸增加。合 金的抗拉强度、屈服强度和伸长率均随铸件冷却速率的降低而降低,其中冷却速率为 0.5 K/s 的铸件孔洞缺陷显著增加 但强度并未骤然降低。

# Effect of Casting Wall Thickness on the Microstructure and Properties of the ZL205A Alloy

YANG Ling<sup>1</sup>, GAO Yanli<sup>1,2</sup>, HAO Huilin<sup>1,2</sup>, LIU Chongzheng<sup>1,2</sup>, PAN Junjie<sup>1,2</sup>, LIU Shanguang<sup>1,2</sup>, WANG Hailong<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. Beijing Engineering Research Center for Advanced Aluminum Alloys, Beijing 100095, China)

**Abstract**: The effects of different wall thicknesses on the microstructure and mechanical properties of casting ZL205A alloy were studied. The results show that the cooling rate of the ZL205A alloy decreases with increasing casting wall thickness, which leads to an increase in alloy grain size. The ultimate tensile strength and elongation of the as-cast alloy thus decrease with the reduced cooling rate due to the coarsened grain, while the yield strength slightly increases considering the annealing effect. The eutectic structure along the grain boundaries of castings with different cooling rates is almost completely dissolved after solution quenching treatment. When the cooling rate is 0.5 K/s, the density and size of the precipitates in the casting are close to each other. When the cooling rate is 0.5 K/s, the density of the precipitates decreases while the size increases. The ultimate tensile strength, yield strength and elongation of the alloy decrease with the reduced cooling rate. The hole defects of the casting with a cooling rate of 0.5 K/s increase significantly, but the strength does not decrease abruptly.

Key words: ZL205A alloy; wall thickness; cooling rate; heat treatment

ZL205A 合金是我国自主研发的一种高强高韧 铸造铝合金<sup>[14]</sup>,作为主次承力结构,已经在航空、航 天和兵器等军工领域广泛应用,在多个重点型号部 件上实现了"以铝代钢"轻量化减重。由于合金成分

- 基金项目:国家高速列车技术创新中心建设专项科技研发项目 (2019JK-0201)
- 作者简介:杨 玲(1984—),学士,工程师.主要从事铝合金及计 算科学与技术等研究工作.电话:01062496224, Email: carp84qq@163.com
- 通讯作者:潘俊杰(1982—),硕士,高级工程师.主要从事铝合金 及其复合材料的研究工作.电话:01062497513, Email:torden@139.com

特性,ZL205A 合金结晶温度范围较宽,结晶温度区 间为 90~110 ℃,为糊状凝固,在凝固过程中容易出 现缩孔、疏松、偏析、热裂等缺陷,铸件内部质量受冷 却速度影响比较明显<sup>[34]</sup>。

在固液共存区,冷却速度越快过冷度越大,熔体 有效形核质点的数量越多,越有利于合金细化<sup>[5-6]</sup>;冷 却速率越慢,有效形核质点数量越少,晶粒具有足够 长的长大时间,不利于晶粒细化。此外,当冷却速率 较慢时,大量溶质原子扩散至固液界面前沿,增加了 铸件偏析倾向<sup>[7-16]</sup>;当冷却速度较快时,大量溶质原 子来不及扩散至固液界面前沿而保留在固相内,从 而提高铸态合金溶质原子的固溶度,降低铸件的偏 析倾向。合金在固液共存区冷却速度较慢时,固溶于

收稿日期:2022-08-13

晶粒内部的氢原子大量析出,一定程度上增加了铸件中孔洞类缺陷倾向<sup>[16-18]</sup>。

对于复杂铝合金铸件,铸件不同部位一般都会存在壁厚差异,不同壁厚处的冷却条件不同,会导致铸件组织和性能产生明显差异。同时,在热处理淬火过程中,不同壁厚造成铸件不同部位导热速度差异,导致溶质原子的固溶程度不同,影响时效强化效果。因此,考虑壁厚对冷却速度的影响,本文研究了铸件壁厚及冷却条件对ZL205A 合金组织和性能的影响,为实际生产提供理论依据。

## 1 实验材料与方法

合金采用精铝锭、AlCu50A、AlMn10A、AlV4A、 AlZr4A、AlTi5A、AlTi5BA等中间合金,以及纯Cd为 原材料,用电阻炉进行熔炼。熔炼工艺为:①将精铝 锭、AlCu50A、AlMn10A、AlV4A、AlZr4A、AlTi5A 装 炉,AlTi5BA和纯Cd放在电阻炉旁预热;②在690℃ 加入Cd,并进行搅拌;③随后炉温升到(740±5)℃保 温15 min并搅拌5 min;④控温至(720±5)℃进行精 炼,精炼剂为C2Cl6;⑤加入AlTi5BA搅拌5 min进 行烧注,浇注温度控制在(710±5)℃。

为了研究铸件壁厚对 ZL205A 合金组织和性能 的影响,浇注厚度为 10、25、35 mm 阶梯试样,如图 1 所示。在砂型上不同试块的中心位置插入热电偶, 利用 FLUKE2638A 温度采集仪测量不同壁厚铸件 的凝固曲线。部分铸件进行热处理,具体工艺为:在 (538±5) ℃进行固溶处理,保温 15 h,然后进行水淬 (淬火转移时间 15 s,水温(60±5) ℃);在(175±5) ℃进



图 1 浇注的阶梯试样 Fig.1 Poured step specimens

行时效处理,保温5h后空冷。

试样经水洗砂纸研磨、Keller 试剂腐蚀,用光学 显微镜(OM, ZEISS, AxioVer.A1)观察铸态和热处理 态铸件晶粒、共晶相形貌、尺寸大小及分布情况。用 扫描电镜(SEM, ZEISS Sigma 500)观察铸件微观组 织,用透射电镜(TEM, JEM-ARM300F)EDS 分析析出 相化学成分。将热处理后试样进行线切割,切取大小为 0.5 mm 厚的薄片,经机械研磨至 50~80  $\mu$ m 左右,冲 取  $\phi$ 3 mm 试片,双喷减薄,获得 TEM 试样。合金经峰 时效后,加工成  $\phi$ 10 mm 标准拉伸试样(拉伸试样尺 寸符合 GB/T 228 要求),在万能试验(Instron3400)机 上进行拉伸性能测试,拉伸速度为 2 mm/min。

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 壁厚对冷却速率的影响

图 2 为不同壁厚铸件的冷却速率。从图中可以 看出,壁厚为 10、25、35 mm 的铸件冷却速率分别为 7.4、2.0、0.5 ℃/s。3 条冷却曲线均完整反应了铸件在 液相区、固液共存区和固相区的冷却过程。冷却速率 为 7.4 ℃/s时,存在明显的结晶潜热释放过程;冷却 速率为 2.0、0.5 ℃/s的铸件凝固曲线较平滑,结晶潜 热释放过程不明显。





2.2 壁厚对组织和力学性能的影响

- 2.2.1 壁厚对铸态组织和力学性能的影响
- 图 3 为 ZL205A 合金不同壁厚不同冷却速率的 铸态组织。由图可知,冷却速率为 7.4 ℃/s 时,未观察



图 3 不同壁厚 ZL205A合金不同冷却速率下的铸态组织 Fig.3 Microstructure of as-cast ZL205A alloy with different cooling rates

到 α(Al)的完整晶界;冷却速率为 2.0、0.5 ℃/s 时,可 观察到 α(Al)具有完整的晶界,晶粒的形貌基本为 等轴晶,且晶粒尺寸随着冷却速率的降低而增大。 冷却速率为 2.0 ℃/s 的铸件在凝固后的冷却过程 中,铸件本体温度降低缓慢,相当于对铸件进行退 火处理,因此发生枝晶球化。

图 4 为不同冷却速率下铸态 ZL205A 合金的

SEM 图。由图可知,不同冷却速率的 ZL205A 合金 铸态组织主要由  $\alpha$ (Al)和共晶 Al<sub>2</sub>Cu 组成,并且在共 晶组织中存在少量白色单质 Cd 相。

图 5 为不同冷却速率铸件铸态条件下晶内 Cu 原子的平均固溶度,由图可知,冷却速率为 7.4、2.0、 0.5 ℃/s 的铸件, 晶内 Cu 原子的平均含量分别为 4.8%、4.0%和 3.7%。可见,随着壁厚的增加,铸件的冷



(a) 7.4 °C/s

(b) 2.0°C/s

(c) 0.5 °C/s

图 4 不同冷却速率下铸态 ZL205A 合金的 SEM 图 Fig.4 SEM images of as-cast ZL205A alloy with different cooling rates



图 5 不同冷却速率铸件晶内 Cu 原子的平均固溶度 Fig.5 Average solid solubility of intragranular Cu atoms in castings with different cooling rates

却速率不断降低,在缓慢的冷却过程中 Cu 原子不断向晶界扩散,晶内 Cu 原子的平均含量不断降低。

表1为不同冷却速率下铸态 ZL205A 合金的室 温拉伸性能,由表1可知,冷却速率为7.4℃/s的铸 件抗拉强度和伸长率最高,屈服强度最低。随着冷 却速率的降低,合金的抗拉强度和伸长率逐渐降 低,而屈服强度逐渐升高。尽管随着冷却速率的降 低,晶内 Cu 原子的固溶度不断降低,但退火效应促

表1 不同冷却速率下铸态ZL205A合金的拉伸性能 Tab.1 Tensile properties of as-cast ZL205A alloy with different cooling rates

Cooling rate	Tensile strength	Elongation	Yield strength
/(°C ⋅s <sup>-1</sup> )	/MPa	/%	/MPa
7.4	203.3	8.7	89.3
2.0	195.0	5.7	100.7
0.5	191.6	4.2	104.4

进晶界 Al<sub>2</sub>Cu 相析出。第二相数量增加,提高了对位 错的钉扎作用,故冷却速率为 2.0、0.5 ℃/s的铸件屈 服强度有所增加。

图 6 为不同冷却速率铸件的拉伸断口形貌,如 图所示,铸态试样的断口主要为解理断裂,随着铸件 冷却速率的降低,解理平台面积增加,合金的脆断程 度增强。原因是随着铸件冷却速率的降低,晶界共 晶组织增加,Al-Cu 共晶为脆性相,试样在变形过程 中首先发生脆断。故随着铸件冷却速率的降低,合 金的伸长率不断降低。

2.2.2 壁厚对热处理态组织和力学性能的影响

图 7 为不同壁厚及冷却速率 ZL205A 合金铸件



图 6 不同冷却速率 ZL205A 合金铸态试样拉伸断口形貌 Fig.6 Tensile fractures of as-cast ZL205A alloy with different cooling rates



(a) 7.4 °C/s

(b) 2.0 °C/s

(c) 0.5 °C/s



的热处理态组织。经画线法分析,冷却速率为7.4、 2.0、0.5℃/s的铸件经热处理后的平均晶粒半径分别 为62.4、66.5、85.6μm。经热处理后,不同冷却速率 的试样晶界上的共晶 Cu 基本完全固溶于晶粒内 部。然而,随着冷却速率的降低,铸件的疏松程度愈 发严重。冷却速率为2.0℃/s的铸件存在少量微观疏 松,而冷却速率为0.5℃/s的铸件疏松比较明显。

表2给为不同冷却速率的铸件经T6热处理后的拉伸性能。随着冷却速率的降低,合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率均呈下降趋势。图8为拉伸试样的断口扫描照片,随着冷却速率的降低,断口韧窝不断减少,沿晶断裂区域不断增加,合金脆断特征明显。

#### 表2 不同冷却速率ZL205A合金T6态拉伸性能 Tab.2 Tensile properties of ZL205A alloy with different cooling rates in T6 state

_		8		
	Cooling rate	Tensile strength	Elongation	Yield strength
	$/(^{\circ}C \cdot s^{-1})$	/MPa	/%	/MPa
	7.4	524.0	8.3	454.8
	2.0	481.6	1.4	443.6
	0.5	460.3	1.1	415.3

## 2.2.3 壁厚对时效析出相形貌的影响

由上述分析可知,壁厚较薄的铸件冷却速率相 对较快,过冷度的增加导致形核质点数量增加,晶粒 更加细小、铸件致密度更高。而壁厚相对较厚的铸 件,冷却速率较慢,过冷度较小,有效形核质点数量 相对较小,晶粒尺寸相对较大,同时在凝固过程中易 产生疏松,致密度相对较低。另一方面,经热处理后, 壁厚较薄的铸件淬透性较好,降温速度快,固溶于晶 内的溶质原子来不及析出(在晶体内部或晶界上)。 而冷却速率相对较低的铸件,淬火过程中温度下降 相对较慢,固溶于晶内的溶质原子有更多的时间进 行扩散,导致溶质原子在晶内或晶界析出,对铸件的 综合力学性能产生不利影响。由图7可知,不同冷却 速率铸件经热处理后,铸态组织中的 Al<sub>2</sub>Cu 共晶基 本全部溶于晶体内部。为了明确淬火过程中溶质原 子的去向,继续分析冷却速率对析出相形貌的影响。

图 9 为不同冷却速率 ZL205A 合金铸件经 T6 热处理后析出相的形貌变化规律。由图可知,冷却速 率为 7.4 和 2.0 ℃/s的铸件峰时效时析出相的密度 和尺寸差异不大。当冷却速率降低至 2.0 ℃/s后,合 金性能的降低主要是由晶粒尺寸增加以及疏松缺陷 导致。当铸件冷却速率降低至 0.5 ℃/s时,析出相的 密度明显降低,而尺寸明显增加。这是由于淬火过程 中,壁厚较厚的铸件温度下降速度相对略慢,起到预 时效的作用。尽管析出相尺寸明显增加,但其长度在 100~160 μm 之间,总体上析出相尺寸并无太大区 别,对力学性能仍有利。因此,尽管冷却速率为 0.5 ℃/s 的铸件疏松程度较冷却速率为 2.0 ℃/s的铸件更加 严重,但其力学性能下降幅度并未明显增加。

## 3 结论

(1)随着铸件壁厚增加,合金冷却速率不断降低,



(a) 7.4 °C/s

(b) 2.0 °C/s

(c) 0.5 °C/s

图 8 不同冷却速率铸件热处理态的拉伸断口 Fig.8 Tensile fractures of heat treated castings with different cooling rates



(b) 2.0 °C/s

(c) 0.5 °C/s 图 9 不同冷却速率铸件热处理态的析出相演变规律

Fig.9 Evolution of precipitates in castings with different cooling rates under heat treated condifion

合金晶粒尺寸增加。冷却速率小于 2.0 ℃/s 的铸件在 固态冷却过程中产生退火效应,铸态组织中呈现胞 状晶、晶粒内部溶质含量随着冷却速率的降低而 降低。

(2)不同冷却速率的铸件经固溶淬火处理后,晶 界的共晶组织几乎完全固溶于晶内,经时效处理后, 合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率均随冷却速率 的降低而降低。

(3) 冷却速率为 7.4 ℃/s 和 2.0 ℃/s 的析出相的 密度和尺寸接近,冷却速率为 0.5 ℃/s 的析出相密 度降低,尺寸增加。

#### 参考文献:

- [1] 贤福超,郝启堂,范理,等.ZL205A 合金块状偏析形成机理[J]. 稀有金属材料与工程,2014,43(4):941-945.
- [2] 王祝堂,田荣璋.铝合金及其加工手册(第三版)[M].长沙:中南 大学出版社,2005.
- [3] 贾泮江,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.
- [4] 吕杰,刘伯操,杨凯,等.高强韧铸造铝合金[J].铸造,2000,49 (2): 66-69.
- [5] 崔海超. Ti、Zr、Sc 对铝合金组织及性能的影响[D]. 郑州:郑 州大学,2007.
- [6] JOHNSSON M. Grain refinement of aluminum studied by use for a thermal technique[J]. Thermochimica Acta, 1995, 256(1): 107-121.
- [7] HAGHAYEGHI R, KAPRANOS P. Comparison on grain refinement efficiency of peritectic and eutectic alloying elements on pure aluminium[J]. Metal and Materials International, 2014, 20(4), 713-717.

- [8] CHEN B A, LIU G, WANG R H, et al. Effect of interfacial solute segregation on ductile fracture of Al-Cu-Sc alloys[J]. Acta Materialia, 2013, 61(5): 1676-1690.
- [9] YANG C, ZHANG P, SHAO D, et al. The influence of Sc solute partitionaing on the microalloying effect and mechanical properties of Al-Cu alloys with minor Sc addition [J]. Acta Materialia, 2016, 119: 68-79.
- [10] ROSALIE J M, BOURGEOIS L. Silver segregation to  $\theta'(Al_2Cu)$ -Al interface in Al-Cu-Ag alloys[J]. Acta Materialia, 2012, 60: 6033-6041.
- [11] VIETZ J T, POLMEAR I J. The influence of small additions of silver on the ageing of aluminium alloys: observations on Al-Cu-Mg alloys[J]. Journal of the Institute of Metals, 1966, 94(12): 410-419.
- [12] 刘晓艳. 含 Ag 的 Al-Cu-Mg 耐热铝合金微观组织与性能研究 [D]. 长沙:中南大学,2011.
- [13] AULD J H. X-ray investigation of ageing in an Aluminium-5wt.% Magnesium alloy with small silver additions[J]. Acta Metallurgica, 1968, 16(1): 97-101.
- [14] REICH L, MURAYAMA M, HONO K, et al. Evolution of  $\Omega$ phase in an Al-Cu-Mg-Ag alloy-a three-dimensional atom probe study[J]. Acta Materialia, 1998, 46(17): 6053-6062.
- [15] MURAYAMA M, HONO K. Three dimensional atom probe analysis of precipitate clustering in an Al-Cu-Mg-Ag alloy[J]. Scripta Materialia, 1998, 38(8): 1315-1319.
- [16] MUDDLE B C, POLMEAR I J. The precipitates  $\Omega$  phase in Al-Cu-Mg-Ag alloys[J]. Acta Materialia, 1989, 37(3): 777-789.
- [17] HATAMI N, BABAEI R, DADASHZADEH M, et al. Modeling of Hot Tearing Formation during Solidification[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 59(10): 1434-1439.
- [18] 王业双,王渠东,丁文东,等. 合金的热裂机理及其研究进展[J]. 特种铸造及有色合金,2000,40(2):48-50.