DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2023.3217

ZL205 合金熔模精密铸造成形能力及 显微组织研究

杨劼人¹,李霄玥¹,廖 泽²,王 晔³,赵晓亮¹,李 程²

(1.四川大学 材料科学与工程学院,四川 成都 610065; 2. 成都兴宇精密铸造有限公司,四川 成都 610100; 3. 哈尔滨理 工大学 材料科学与化学工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要:ZL205 合金由于其高强度和组织-性能热处理可调的优势,在航空航天领域具有重要应用。本文针对 ZL205 合金铸造特性,设计出包含不同类型、不同尺寸工艺件的浇注系统,然后开展了重力条件下熔模精密铸造技术研 究,在 200、500 ℃模壳预热温度、空冷和风冷条件下,对各工艺件成形能力及铸造缺陷进行分析。进一步研究了典型尺 寸工艺件内的铸造组织特征,探讨了壁厚、冷速等因素对 ZL205 合金显微组织的影响,为各类型 ZL205 合金构件熔模 精铸提供工艺指导。

关键词:ZL205 合金;熔模精密铸造;流动及充型;成形性能;凝固组织

文献标识码:A

中图分类号: TG146.2

文章编号:1000-8365(2023)11-1004-08

Formability and Microstructure of ZL205 Alloy in Investment Casting

YANG Jieren¹, LI Xiaoyue¹, LIAO Ze², WANG Ye³, ZHAO Xiaoliang¹, LI Cheng²

(1. College of Materials Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Chengdu Xingyu Precision Casting Co., Ltd., Chengdu 610100, China; 3. School of Materials Science and Chemical Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150004, China)

Abstract: ZL205 alloy has important applications in aerospace field because of its high strength, adjustable microstructure and properties. Aiming at the casting performance of ZL205 alloy, this paper first designed the pouring system including different types and sizes of process parts and fabricated the ceramic mold shell. Then, the investment casting technology under gravity conditions was carried out. Under the preheating temperatures of 200 and 500 °C, natural and air cooling, the forming ability and casting defects were analyzed. Further, the microstructure of typical parts were studied, and the influence of wall thickness, cooling rate and other factors on the solidified microstructure was discussed. The results can provide technical guidance for investment casting of various types of ZL205 alloy components.

Key words: ZL205 alloy; investment casting; flow and filling; shaping ability; solidification microstructure

ZL205 合金,牌号为ZAlCu5MnCdVA,属于Al-Cu 系合金,是我国自行研制的一类高强度铸造 Al 合 金^[1-2]。由于含有较多的 Cu、Mn 元素,可进行固溶-时效热处理,通过析出相控制来获得高性能,比如 在 T6 热处理状态下,抗拉强度最高可达到 470 MPa, 且同时展现出良好的韧塑性、抗蚀性和可加工性^[5-7]。 因此,结合以上 Al 合金的轻质优点,ZL205 合金在 航空、航天、武器装备等领域,备受青睐,受到广泛 工程化应用^[6-8]。

然而,ZL205A 合金是宽结晶温度范围的合金,

糊状区温度范围为~150 ℃^[9],糊状凝固特征非常明 显,难以实现顺序凝固,从液态到固态的线收缩明显 大于 Al-Si 系合金,可达到 1.3%,因此疏松、热裂倾 向、壁厚敏感性均较大^[8]。同时,合金共晶组织中的 CuAl₂ 金属间化合物相在熔点附近塑性差,收缩时 很容易被拉裂而形成裂纹,制约了 ZL205A 合金的 推广及高端应用^[10-12]。

为此,本文针对 ZL205 合金铸造特性,开展其重力条件下熔模精密铸造技术研究,在模壳预热温度、冷区条件影响下,对各类型、尺寸工艺件成形能

- 基金项目:四川省重点研发计划(SC2022A1C01J);四川省科技重大专项(23ZDZX0031);成都市科技局高校院所科技人才创新服务项目(2022-RC03-00001-CG)
- 作者简介:杨劼人,1984年生,博士,研究员.研究方向为先进金属材料设计及其凝固加工.Email:yangjieren@scu.edu.cn

引用格式: 杨劼人,李霄玥,廖泽,等. ZL205 合金熔模精密铸造成形能力及显微组织研究[J]. 铸造技术, 2023, 44(11): 1004-1011

收稿日期: 2023-08-22

YANG J R, LI X Y, LIAO Z, et al. Formability and microstructure of ZL205 alloy in investment casting[J]. Foundry Technology, 2023, 44(11): 1004-1011

力及缺陷进行系统分析。进一步研究典型工艺件内的 组织特征,探讨壁厚、冷速等对 ZL205 合金组织结 构影响,为各类型 ZL205 合金精铸件提供工艺指导。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

本研究使用的铝锭为 ZL205 合金,尺寸为 80mm× 80 mm×720 mm,其名义及测量成分如表 1 所示,符 合 HB 5480-91 标准要求。其中,Cu 能提高沉淀相数 量及弥散度,是最重要的合金元素,并且改善沿晶 腐蚀性能^[1];Mn 和 Cu 形成 Al₁₂CuMn₂ 相,有很高的 热稳定性,改善合金耐热性和耐蚀性^[1,13];Ti 和 Zr 元 素可以细化合金组织,提高机械性能,也能减少热裂 倾向;B和Cd元素也可以细化组织,提高合金塑性,但 当Cd 超过 0.3%(质量分数)时,晶界存在熔点较低的 元素游离 Cd^[1,13-15],容易导致铸件淬火开裂;V 元素 可以显著降低 Fe 的有害作用,提高合金耐热性降 低针孔形成倾向,提高组织致密性^[1,16]。

表 1 ZL205 合金化学成分 Tab.1 Chemical compositions of ZL205 alloy in the current study

				(mass fraction/%)	
Element	Si	Mn	Ti	V	Cu
Nominal content	≤0.06	0.3~0.5	0.15~0.35	0.05~0.3	4.6~5.3
Measured content	0.032	0.385	0.175	0.128	5.11
Element	Mg	Fe	Zr	В	Cd
Nominal content	≤0.05	≤0.15	0.05~0.2	0.005~0.06	0.15~0.25
Measured content	0.0068	0.0256	0.121	0.0116	0.17

1.2 工艺件及浇注系统设计

采用底注形式,对 ZL205 合金工艺件进行浇注 系统设计,如图 1 所示。底注形式是为了最大程度 调控合金液在充型中的流动方向和充型速度,使合 金液能够连续、平稳充填,从而抑制合金液在流动 过程中冲刷型壳内表面,防止紊流、卷气,降低铸件 内的夹渣、气孔等凝固缺陷。

设计了具有不同几何形状类型和尺寸的工艺件,所有工艺件高度均为300mm,流道截面尺寸为40mm×40mm:板片状工艺件中,厚度分别为3、6、12和24mm;棒状工艺件中,直径分别为3、10、20和40mm。从图1可知,合金液从直浇道流入,通过底部横浇道,逐渐进入各工艺件,各工艺件所处位置相当于整体浇注系统中的内浇道区域,上部横浇道设计一是为了固定工艺件,二是起到对工艺件补缩的作用。

1.3 蜡模及模壳制备

ZL205 合金浇注系统蜡模制作主要包括熔模压



图 1 ZL205 合金浇注系统结构及尺寸设计 Fig.1 Design of pouring system and sample sizes in ZL205 investment casting

制、熔模组焊两步,如图 2a~b 所示。熔模压制过程中 首先进行压型安装,接着压制熔模,最后取出熔模并 进行水冷(即熔模空冷)处理。在取出熔模后,采用水 冷或空气冷却方式,以避免熔模变形,待冷却后,将 熔模放置于专用蜡模架上,以备后续使用。熔模组焊 过程按照预先制定的工艺流程,将焊接好的熔模 精准组合在相应浇口棒上,通常会进行蜡模修整、检 验、采用粘接法和机械组装,并清理蜡模组,最终形 成蜡模组。

型壳制备过程如图 2c 所示,主要包括清洗蜡模 组、挂涂料、撒砂干燥、硬化脱蜡、型壳焙烧。模组清 洗时,采用压缩空气对模组表面进行均匀吹扫、干 燥,然后准备好浆料。面层浆料主体材料为硅溶胶、 325 目莫来石粉、60~80 目莫来石砂,背层浆料主体 材料为 200 目莫来石粉,16~30 目莫来石砂。对面层 进行双层涂覆,而加强层进行 5 层涂抹。采用人工操 作浸浆和喷浆,确保涂料涂布均匀,涂料不从模组 上连续滴落,然后在撒砂机上完成撒砂操作,其目 的在于增厚型壳、分散应力,并使前后涂料层紧密 结合。

型壳涂覆后,对其进行干燥、硬化,促使黏结剂 从溶胶向凝胶转变,从而将耐火材料颗粒紧密结合。 采用硅溶胶涂料黏结剂,其凝结过程为水分挥发,只 需进行干燥。型壳完全硬化后,进行脱蜡、焙烧工序, 本研究在高温脱蜡釜中进行,焙烧温度720℃,焙烧 时间为4h。焙烧过程中,所有残留模料、杂质被完全 消除,焙烧时间越长,型壳强度越高,且越容易烧结。 经过高温烘烤,壳体的强度得到提升,同时面层表面 更加平滑。



图 2 ZL205 合金浇注系统制作:(a) 板状蜡模,(b) 棒状蜡模,(c) 型壳涂挂,(d) 浇注 Fig.2 Production of ZL205 alloy casting system: (a) plate wax mold, (b) rod wax mould, (c) shell hanging, (d) liquid alloy pouring

1.4 实验参量制定

ZL205 合金固相线和液相线温度分别为~650 ℃和~540 ℃,考虑到合金流动性较差,浇注温度定 为725 ℃。将型壳预热温度和浇注后冷却方式作为 变量,首先选取型壳预热参数为200 ℃和500 ℃, 不考虑非预热情况。精炼后的合金液,由人工转移 平稳倒入预热好的型壳中,如图2d所示。浇注完成 后,选取自然冷却(natural cooling, NC)和吹风冷却 (air cooling, AC)两种方式,将盛有ZL205 合金的模 壳冷却至室温,然后振动脱壳。

2 成形性能分析

2.1 成形完整性分析

4种浇注条件下的 ZL205 合金工艺件成形结果 如图 3 所示,统计结果在表 2 中列出。可以发现,在 4 个精密铸件中,直径为 3 mm 的棒状工艺件均无法 成形,说明 ZL205 金属液刚流进内浇道,散热量大、 温度下降较快,最先发生凝固,几乎都呈现未充型 状态。

型壳预热温度为 200 ℃时,在风冷铸件(图 3a)



图 3 不同浇注条件下 ZL205 合金工艺件成形能力:(a) 200 ℃,风冷,(b) 200 ℃,空冷,(c) 500 ℃,风冷,(d) 500 ℃,空冷 Fig.3 Shaping performance of ZL205 castings under different pouring conditions: (a) 200 ℃, AC, (b) 200 ℃, NC, (c) 500 ℃, AC, (d) 500 ℃, NC

表 2 ZL205 合金精铸成形能力分析 Tab.2 Filling capacity of ZL205 alloy in investment casting

Costing size/mm	Filling ability under different pouring conditions					
Casting Size/IIIII	200 °C/AC	200 °C/NC	500 °C/AC	500 °C/NC		
ϕ 3 (inside)	0	16%	0	0		
ϕ 3 (outside)	0	0	0	0		
$\phi 10$	75%	80%	100%	100%		
φ20	100%	100%	100%	100%		
$\phi 40$	100%	100%	100%	100%		
3×40 (inside)	54%	90%	100%	100%		
3×40 (outside)	0	39%	100%	100%		
6×40	100%	100%	100%	100%		
12×40	100%	100%	100%	100%		
24×40	100%	100%	100%	100%		

和空冷铸件(图 3b)中,直径为 3 mm 的棒状工艺件 及厚度为 3 mm 的片状工艺件,都没有充型完整,这 是由于其型壳预热温度较低,样品截面尺寸仍旧偏 小,再加上 ZL205 合金糊状凝固导致的本征流动性 差。由于风冷型壳比自然冷却型壳的冷速更快,合 金液凝固也更快,所以其充型程度和成形能力相对 更低。可以推测,如果在型壳不预热情况下,厚度为 6、12 mm 的板状工艺件,直径为 10、20 mm 的棒状 工艺件,甚至截面尺寸更大的工艺件,也会出现不 能完整成形的情况。

当型壳预热温度增加到 500 ℃时,工艺件成形 能力得到明显加强,如图 3c 和图 3d 所示。特别地, 厚度为 3 mm 的片状工艺件也实现了完整充型。在 预热 200 ℃时,10 mm 棒状工艺件仅为部分成形, 但是型壳预热 500 ℃后实现了完整成形。

ZL205 合金在精密铸造的凝固过程中容易发生 热裂,特别是变截面和壁厚尺寸差异较大的区域。 主要是由于宽结晶范围和凝固速率同时作用,导致 相邻区域材料冷速不同,先凝固合金受到拉应力, 容易开裂。本研究中,热裂情况不严重,在3mm片 状样品根部有发现,主要是由于本浇注系统设计通 过上横浇道结构形成了较强补缩能力,对糊状区凝固产生的缺陷有"愈合"作用。改善ZL205合金热裂的方法主要有3点:①提升浇注系统补缩能力;②尽量避免大变截面的结构设计;③采用特种凝固技术, 使合金在压力下充型凝固。

2.2 表面质量分析

选取 ZL205 合金棒状样品进行表面质量分析, 结果如图 4 所示。整体而言,各个浇注条件下直径为 40 mm 的棒状工艺件表面质量一般(图 4a),表面较 为粗糙,分布有孔洞,横浇道与工艺铸件连接处有较 大程度的收缩,这是由变截面引起的凝固顺序不均 匀导致。

无论是 200 ℃还是 500 ℃型壳预热温度下,吹 风冷却时的铸件表面(①和③)要比自然冷却(②和 ④)的铸件光滑,这是由于风冷下工艺件表面快速凝 固,ZL205 合金熔体与模壳面层的浸润时间较短。对 比不同直径工艺件,直径为 20 mm 的样品表面相对 光滑,与浇道衔接处也未见明显缺陷,如图 4b 所示, 这可能是因为其根部与横浇道的凝固顺序和温度变 化基本保持同步。

图 4c 展示了直径为 10 mm 棒状样的表面质量 情况,明显看出型壳预热 200 ℃时的 10 mm 棒状样 未充型完整,同时反映出该直径工艺件是从上下两 端同时充型,均由于过热度及温度下降而停止,但表面 相比于直径 40 mm 铸件更光滑。型壳预热 500 ℃时 的 10 mm 棒状样充型完整,因为其尺寸较小,冷却 时发生收缩引起了铸件断裂。

2.3 铸造缺陷分析

图 5a 所示为4种浇注条件下 ZL205 合金3 mm 薄片状工艺件的 X 光探伤图像。型壳预热 200 ℃ 时,3 mm 薄片充型困难,且肉眼可见较多气孔和缩 松。相比之下,型壳预热增加 500 ℃后充型完整,缩孔 和夹渣情况大幅减轻。图 5b 为 ZL205 合金6 mm 薄



图 4 不同浇注条件下 ZL205 合金工艺件表面质量: (a) ϕ 40 mm, (b) ϕ 20 mm, (c) ϕ 10 mm Fig.4 Surface quality of ZL205 castings under different pouring conditions: (a) ϕ 40 mm, (b) ϕ 20 mm, (c) ϕ 10 mm



①—200 °C/AC; ②—200 °C/NC; ③—500 °C/AC; ④—500 °C/NC



壁铸件 X 光无损检测图,4 个样品均实现充型完整, 且组织致密,内部几乎未见缺陷,铸件质量较好。可 见,随着薄壁铸件的壁厚逐渐增加,充型越来越完 整,铸件内部的缩孔缩松等缺陷也越来越少。

图 6a 显示了 4 种浇注条件下 ZL205 合金 10 mm 直径棒状工艺件的 X 光探伤照片。类似于板状工艺 件,型壳预热 200 ℃时,如图 4c 所示,10 mm 直径 棒状样充型不完整,且自然冷却条件下的内部缩孔 情况较为严重,这可能是由于凝固速率相对较慢, 宽凝固区间导致的糊状凝固组织收缩引起的。型壳 预热增加到 500 ℃时,工艺件完整充型,但同样在 自然冷却样品中出现了较多缩孔,且情况较为严重。 图 6b 为 ZL205 合金直径 20 mm 棒状工艺件的 X 光探伤照片。可以看出,型壳预热 200 ℃时,20 mm 直径棒状铸件根部凝固时没有得到及时补缩,分布 有非常严重的海绵状缩松。相比之下,型壳预热 500 ℃的 20 mm 直径棒状铸件根部虽然也有纤维 状缩松,但尺寸和面积不大,根部收缩不明显。由此 可以推论,采用较高的型壳预热温度,可显著抑制 厚区域内铸造缺陷的产生。

由图 5 和图 6 还可以发现,本研究中未发现明显的宏观偏析,部分探伤结果如图 6b 所示,呈现为典型的缩松缺陷形貌。ZL205 合金如果出现宏观偏析,在 X 射线探伤图上会呈现出大面积、黑白衬度差异明显的区域,通常发生在浇口附近,这是由于Cu元素密度高,在熔体底部富集,因此最后浇注出的金属液含有较高含量的 Cu元素,表现为宏观偏析。

3 精铸工艺件典型显微组织特征

图 7 展示了型壳预热 500 ℃下的 ZL205 合金 板片状工艺件显微组织,组织形态均为等轴状,差异 性不明显。同时可发现,12 mm 厚度的样品凝固显 微组织(图 7a~b)由于较快的冷速,相对较细化,平均 晶粒度为~15 µm。相对比,由于壁厚较厚导致冷速 较慢,24 mm 板材厚度样品等轴晶大小为~20 µm (图 7c~d)。



研究表明,ZL205 合金铸态组织的相组成包含α

图 6 不同浇注条件下 ZL205 合金棒状工艺件探伤:(a) ϕ 10 mm,(b) ϕ 20 mm Fig.6 X-ray detection of defects in ZL205 rod castings: (a) ϕ 10 mm, (b) ϕ 20 mm



图 7 型壳预热 500 ℃下的 ZL205 合金板片状工艺件显微组织:(a) 12 mm,风冷,(b) 12 mm,空冷,(c) 24 mm,风冷,

(d) 24 mm,空冷

Fig.7 Microstructure of ZL205 plate castings under the mold preheating of 500 °C: (a) 12 mm, AC, (b) 12 mm, NC, (c) 24 mm, AC, (d) 24 mm, NC

固溶体基体、θ-Al₂Cu、T-Al₁₂Mn₂Cu、Al₃Ti、Cd、Al₇V、 TiB₂^[17-18]。合金中的Cu与Al形成θ相,起到弥散硬 化作用^[1,19-20]。合金中Mn与Al、Cu形成T-Al₁₂Mn₂Cu 相,进行固溶时效处理时,可以呈弥散质点析出,从 而提升合金室温和高温强度。通常,少量灰色块状 ZrAl₃相和灰白色条状Al₃Ti相分布在α固溶体上, 晶界处出现的网状组织主要为θ-Al₂Cu和黑灰色 T-Al₁₂CuMn₂相的混合组织^[1,21]。

图 8 进一步呈现了两种冷速差异较大情况下 的显微组织。图 8a 为型壳预热 500 ℃、风冷条件下, ZL205 合金 3 mm 厚度板材工艺件内的组织,平均 晶粒大小~8 μm。图 8a 为自然冷却条件下,24 mm 厚度工艺件组织,其冷速显然小于前者,这也导致了相 对粗大的凝固晶粒尺寸,大小~20 μm。随着冷却速率 降低,合金组织的等轴形态没有明显变化,但其晶 粒尺寸有所增大,特别是较厚的试样。

同时,在型壳预热 500 °C、风冷条件下,24 mm 厚度横截面上选取靠近表面、半径处和心部区域 3

个位置,发现距离表面越近的部分,晶粒尺寸越小。 铸件凝固是从外向内顺序凝固,表面和模壳接触, 冷速相对较快,中心部分的合金不能及时导热,冷 速相对最慢,导致同一高度截面上出现组织不均匀 和差异性。

图 9 更加表明了壁厚对显微组织的影响,铸件 壁厚处比薄处的金属液凝固需要时间更长。凝固所 需时间越长,晶粒尺寸就越大。在金相显微镜下可 以清晰地观察到不同壁厚的晶粒尺寸大小,随着壁 厚的增加,晶粒也逐渐增大,在壁厚处晶粒都更加 粗大。在 24 mm 处的晶界相较于薄处的晶界更加粗 大,晶界上更容易形成网状的 θ 相和 T 相的混合组 织^[22-23],并且随着晶粒的粗大,晶界间的网状析出相 也越来越多。因此晶粒间的联系就不那么紧密,薄 壁晶粒度明显更小,且整体组织较厚壁更加均匀。

4 结语

本工作开展了 ZL205 合金熔模精密铸造成形



图 8 冷速对 ZL205 合金板片状显微组织影响:(a) 3 mm,风冷,(b) 24 mm,空冷 Fig.8 Effect of cooling rate on the microstructure of ZL205 plates: (a) 3 mm, AC, (b) 24 mm, NC



图 9 工艺件板厚对 ZL205 合金显微组织的影响: (a) 3 mm, (b) 6 mm, (c) 12 mm, (d) 24 mm Fig.9 Effect of plate thickness on the microstructure of ZL205 castings: (a) 3 mm, (b) 6 mm, (c) 12 mm, (d) 24 mm

能力及显微组织研究,在模壳预热温度 200 ℃和 500 ℃、空冷和风冷条件下,对不同尺寸板状和棒状 工艺件充型规律及铸造缺陷进行了分析。当前重力 条件和底注式浇注系统如下:3 mm 棒状结构为其 极限成形尺寸。减小壁厚、提升冷速,可以对 ZL205 合金凝固组织进行细化,研究结果可指导复杂薄壁 ZL205 合金构件熔模精铸成形。

参考文献:

[1] 张海珍. ZL205A 高强度铝铜合金铸造性能及工艺技术研究[D]. 太原:中北大学,2010.

ZHANG H Z. The study on casting properties and process technology of ZL205A high strength aluminum alloy [D]. Taiyuan: North University of China, 2010.

- [2] 迟秀梅,何凯,肖旅. ZL205A 薄壁异型铸件金属型铸造工艺研究[J]. 航天制造技术,2015(3): 23-25, 28.
 CHI X M, HE K, XIAO L. Study on metal mold casting process of ZL205A thin-walled castings[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2015(3): 23-25, 28.
- [3] 陈延伟,刘佳琳,赵亚鹏. 铸造铝合金在舰船装备应用中存在的问题及发展趋势[J]. 铸造,2020,69(4): 329-334.
 CHEN Y W, LIU J L, ZHAO Y P. Existing problems and develop ment prospect of application of cast aluminum alloys to warship equipment[J]. Foundry, 2020, 69(4): 329-334.
- [4] 宋京涛. 典型结构薄壁铝合金铸件的工艺设计和优化[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2014.
 SONG J T. Process design and optimization on thin-walled aluminum alloy casting with typical structure[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014.
- [5] GAO L, LI K, NI S, et al. The growth mechanisms of θ' precipitate phase in an Al-Cu alloy during aging treatment [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 61: 25-32.
- [6] 邓运来,张新明.铝及铝合金材料进展[J].中国有色金属学报,

2019, 29(9): 2115-2141.

DENG Y L, ZHANG X M. Development of aluminium and aluminium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 2115-2141.

[7] 黄光杰,汪凌云.铝锂合金的发展,应用和展望[J].材料导报, 1997,11(2):21-24.

HUANG G J, WANG L Y. Development, Application and prospect of aluminum-lithium alloys [J]. Materials Reports, 1997, 11(2): 21-24.

- [8] 张晓娜,李辉,胡孟谦. 高强度 Al-Cu 系合金熔炼过程控制系统研制[J]. 铸造技术,2017,38(10): 2514-2516.
 ZHANG X N, LI H, HU M Q. Development of control system for melting process of high strength Al-Cu alloy[J]. Foundry Technology, 2017, 38(10): 2514-2516.
- [9] 王晔. ZL205A 简形件低压铸造宏观偏析形成机制及补缩行为
 [D]. 哈尔滨:哈尔工业大学,2015.
 WANG Y. Formation mechanism of the macro segregation and feeding behavior in of ZL205A cylindrical castings by low pressure die casting process[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [10] 邓攀科,杨智勇,韩建民,等. ZL205A 真空调压铸造有效应力控制与性能研究[J].铸造,2019,68(12):1368-1373.
 DENG P K, YANG Z Y, HAN J M, et al. Study on effective stress control and properties of vacuum pressure regulating casting ZL205A[J]. Foundry, 2019, 68(12): 1368-1373.
- [11] 程运超,杨光昱,吕三雷,等.石膏型铸造铝合金真空增压凝固 和真空自由凝固组织及力学性能[J].铸造,2014,63(1):10-14. CHENGYC,YANGGY,LVSL,et al. Study on microstructures and mechanical properties of plaster mold casting aluminum alloy under the condition of vacuum pressurizing solidification and vacuum solidification[J]. Foundry, 2014, 63(1):10-14.
- [12] 牛经纬,张国伟. Al-Ti-C 中间合金在 ZL205A 合金石膏型铸造 中的应用[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(2): 194-197.
 NIU J W, ZHANG G W. Effects of Al-Ti-C master alloy on microstructure and properties of plaster mold casting ZL205A alloy

[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(2): 194-197.

- [13] 孙全珍. ZL205A 合金非平衡凝固薄壁效应及组织形成机理研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2021.
 SUN Q Z. Study on thin wall effect and microstructure formation mechanism of ZL205A alloy non-equilibrium solidification [D].
 Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2021.
- [14] 李作为,刘晓滕,郝海,等. Gd 对 ZL205A 合金显微组织和力学 性能的影响[J]. 铸造,2013,62(6):549-553.
 LI Z W, LIU X T, HAO H, et al. Effect of Gd on microstructures and mechanical properties of ZL205A alloys[J]. Foundry, 2013, 62 (6): 549-553.
- [15] ZHOU S Y, WU K, YANG G, et al. Microstructure and mechanical properties of wire arc additively manufactured 205A high strength aluminum alloy: The comparison of as-deposited and T6 heat-treated samples[J]. Materials Characterization, 2022, 189: 111990.
- [16] 李元元,郭国文,张卫文,等. 合金元素对 Al-Cu 合金热裂倾向的影响[J]. 中国有色金属学报,2001,11(5): 791-795.
 LI Y Y, GUO G W, ZHANG W W, et al. Effects of alloying elements on hot tearing trends of A-1 Cu alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(5): 791-795.
- [17] MI G F, WANG K F, GONG H J, et al. Microstructure and properties of ZL205 Alloy[J]. China Foundry, 2008, 5(1): 24-27.
- [18] LIU Z X, DANG L, CHENG J Q. Influence of heat treatment on microstructure and tensile properties of a cast Al-Cu-Si-Mn alloy [J]. China Foundry, 2013, 10(6): 355-359.

[19] 王苏华. ZL205A 高强度铝铜合金的铸造及热处理[J]. 四川工业 学院报, 1996(2): 51-54.
WANG S H. Casting and heat treatment for ZL205A high strength

Al-Cu alloys[J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 1996(2): 51-54.

- [20] 王狂飞,许广涛,周志杰,等.铸造方法对 ZL205A 合金砂型铸造 组织的影响[J].特种铸造及有色金属,2015,35(6):629-632.
 WANG K F, XU G T, ZHOU Z J, et al. Effect of sand mold casting method on microstructure of ZL205A alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2015, 35(6): 629-632.
- [21] 舒群,陈玉勇,徐丽娟. 砂型铸造 ZL205A 合金组织与力学性能的研究[J]. 特种铸造及有色合金,2005,25(2):75-78.
 SHU Q, CHEN Y Y, XU L J. Microstructure and mechanical properties of ZL205A alloy in sand casting [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2005, 25(2):75-78.
- [22] 郭廷彪,冯瑞,王炳,等. 固溶及时效处理对 ZL205A 合金腐蚀性能的影响[J]. 材料热处理学报,2023,44(4): 87-94.
 GUO T B, FENG R, WANG B, et al. Effect of solution and aging treatment on corrosion properties of ZL205A alloy [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2023, 44(4): 87-94.
- [23] 马铁军,葛进国,常雷,等. ZL205A 合金 T5 热处理后的微观组 织与力学性能[J]. 金属热处理,2019,44(8): 7-14.
 MA T J, GE J G, CHANG L, et al. Microstructure and mechanical properties of ZL205A alloy after T5 heat treatment [J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(8): 7-14.