基于仿真计算的 ZL205A 骨架铸件成形工艺设计优化

张建平[1]，刘　静[1]，师素粉[1]，樊振中[2, 3]，刘闪光[2, 3]，
孙　刚[2, 3]，罗传彪[2, 3]，潘俊杰[2, 3]

（1. 中国航空工业庆安集团有限公司，陕西西安 710077；2. 中国航发北京航空材料研究院，北京 100095；
3. 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：采用垂直缝隙式浇道低压铸造工艺开展了ZL205A骨架铸件工艺试制，基于Pro-CAST软件对其凝固过程出现的疏松、热裂缺陷形成机理进行数值分析。结果表明，增设内浇道补缩结合顶端冷铁形状及厚度优化，可有效减少孤立液-固两相区域面积，厚壁过渡区域与加强筋和蒙皮交接部位在凝固中后期可得到有效压力补缩，冶金质量显著提升。蒙皮区域铸态晶粒尺寸与本体力学性能均优于厚壁部位，分别为89 μm、抗拉强度471.5 MPa、屈服强度428.8 MPa和伸长率7.9%，断口表面可观察到明显的沿晶撕棱带及细小尺寸微观韧窝，材料断裂机制为沿晶断裂+韧窝断裂，以韧窝断裂为主。材料T6态强化机制为析出强化与位错强化。提高厚壁部位凝固冷速，可提升Al_2Cu强化相析出数量，改善铸件力学性能。本研究可为大型航空骨架类铸件成形设计提供工艺参考与技术支撑。

关键词：骨架铸件；ZL205A铝合金；工艺仿真；低压铸造；力学性能

中图分类号：TG292；TG146.2$^+$1；T391.9　**文献标识码：**A　**文章编号：**1001-4977（2026）10-1146-10

DOI：10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0146

Simulation-Based Forming Process Design and Optimization of the ZL205A Frame Casting

ZHANG Jian-ping[1], LIU Jing[1], SHI Su-fen[1], FAN Zhen-zhong[2, 3], LIU Shan-guang[2, 3],
SUN Gang[2, 3], LUO Chuan-biao[2, 3], PAN Jun-jie[2, 3]

(1. AVIC Qing'an Group Co., Ltd., Xi'an 710077, Shaanxi, China; 2. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 3. Beijing Advanced Engineering Technology and Application Research Center of Aluminum Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: The ZL205A frame casting trial production was carried out by low-pressure casting with a vertical slot gating system design, and numerical analysis was conducted using Pro-CAST software to investigate the formation mechanisms of porosity and hot tearing defects during solidification process. The results show that additional internal feeding gates and optimal top chill shape and thickness can significantly reduce the area of isolated liquid-solid regions, and the thick-walled transition zones and the junctions between stiffeners and skin can obtain effective pressure feeding in the late stages of solidification, and the metallurgical quality is improved significantly. The as-cast grain size and mechanical properties in the skin region are superior to that of the thick-walled section, with values of 89 μm, tensile strength 471.5 MPa, yield strength 428.8 MPa, and elongation 7.9%, respectively. Distinct intergranular tearing ridges and fine dimples are observable on the fracture surface and the fracture mechanism is a combination of intergranular and dimple fracture, with the latter predominating. The strengthening mechanisms in T6 state are involved of precipitation strengthening and dislocation strengthening. The quantity of the precipitated Al_2Cu strengthening phases is raised by increasing the solidification cooling rate of thick-walled regions, further improving the mechanical properties of the casting. This research can provide process references and technical support for the forming design of large-sized frame-type castings.

Key words: frame casting; ZL205A aluminium alloy; process simulation; low-pressure casting; mechanical properties

基金项目：重点领域技术攻关项目（KJSZ220203）。

收稿日期：2026–06–24 收到初稿，2026–07–16 收到修订稿。

作者简介：张建平（1979–），男，高级工程师，主要从事航空大型复杂构件精密铸造成形研究工作。E-mail：36175249@qq.com

通信作者：樊振中，男，教授。E-mail：fanzhenzhong2010@163.com

引用格式：张建平，刘静，师素粉，等 . 基于仿真计算的 ZL205A 骨架铸件成形工艺设计优化 [J]. 铸造，2026，75（10）：1146–1155.

Zhang Jianping，Liu Jing，Shi Sufen，et al. Simulation-based forming process design and optimization of the ZL205A frame casting[J]. Foundry，2026，75（10）：1146–1155.

作为一种轻质结构金属材料，铝合金因其密度低、耐蚀性佳、比强度高、比刚度高、成形工艺优良，被广泛用于制造飞机、运载火箭、新能源汽车、船舶、化工等装备制造领域[1-5]。铝合金的制造工艺主要包括铸造、锻造、轧制、挤压与增材制造等。铸造成形尤其适用于复杂结构铝合金制件的批量生产，制造周期短、生产成本低，结合结构设计优化可在材料减重的基础上，通过一体化近净成形制造进一步实现结构减重，轻量化效果显著[6-7]。

铝铜系铸造铝合金因具有较高的室温及高温力学性能，广泛用于大型航空航天飞行器重要承载结构部件的加工制造，其中尤以北京航空材料研究院研制的ZL205A铝合金应用最为广泛[8-11]。20世纪90年代国内南昌飞机制造公司章舜如等[12]采用铝铜系铸件用于强五飞机大型导弹挂梁产品研制。河南平原光电司金梅等[13]基于工艺仿真和3DP砂型成功研制出了飞机用铝铜系大型薄壁电子机箱骨架铸件。中航工业庆安集团师素粉等[14]通过在厚壁部位设置冷铁，实现了ZL205A骨架铸件顺序凝固，大幅减少了疏松、缩孔缺陷。北京航空材料研究院于海军等[15]设计底注式浇注系统，通过调整型壳温度和浇注温度，成功实现了ZL205A骨架铸件的熔模精密铸造。杜旭初等[16]从铸造工艺设计、型芯材料选择和热处理工艺及尺寸控制四个方面优化分析，实现了某型ZL205A环类铸件的成功研制。随着计算机技术的发展，工艺仿真可将充型过程的温度场、流动场可视化，通过对凝固组织模拟分析，实现对铸造缺陷的精准预测，加快工艺优化过程，缩短产品开发周期，显著降低研发成本[17]。清华大学贾良荣等[18]基于有限差分法和SOLA-VOF数值模拟技术建立了液态金属充填型腔过程的流动及耦合传热计算数学模型，可实现液态金属充型过程的紊流精准模拟。华中科技大学廖敦明等[19]基于有限差分法建立了凝固过程热应力场计算的数学模型和数值方法。清华大学许庆彦等[20]提出了一种铝合金枝晶生长模拟的随机计算方法，建立了简化枝晶形态的物理和数学模型，采用形状函数描述晶粒轮廓形貌，可精确模拟铸造铝合金等轴晶生长过程，计算精度较高。华中科技大学殷亚军等[21]和中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司艾雨蒙等[22]采用数值模拟完成了多型复杂铝铜系铸件的成功研制，大幅节省了新产品的研发成本。

本文以某大型ZL205A骨架铸件为研究对象，采用Pro-CAST铸造工艺仿真软件，结合低压铸造工艺设计对骨架铸件充型及凝固过程进行数值模拟分析，基于数值计算结果优化浇注系统，并进行实际生产验证，有效降低了ZL205A骨架铸件的疏松缺陷，可为国内其他科研生产单位开展大型ZL205A骨架类铸件高质量、低成本研制提供工艺参考与数据支撑。

1 合金材料制备与成形工艺设计

1.1 合金材料制备与组织性能表征

合金材料为ZL205A，所用原材料为A1锭（99.9wt.%）、Al-50Cu中间合金、Al-10Mn中间合金、Al-5Cd中间合金、Al-5Ti中间合金、Al-4V中间合金、Al-5Zr中间合金和Al-5Ti-B中间合金。采用东莞金力泰 GR3-1000型电阻式坩埚炉进行熔炼，添加Al锭、Al-50Cu中间合金、Al-10Mn中间合金、Al-5Cd中间合金、Al-5Ti中间合金、Al-4V中间合金、Al-5Zr中间合金后在800 ℃进行过热，采用氩气进行精炼除气处理，精炼温度为735~745 ℃，精炼时间为15~20 min，精炼后添加Al-5Ti-B中间合金作晶粒细化处理，随后扒渣，静置5~10 min后降温至（710 ± 10）℃，进行低压浇注。ZL205A合金材料热处理在深圳中达ZDXS5-5-1000型马弗炉中进行，炉温精度为 ± 3 ℃。合金化学成分采用Thermo Scientific ICAP 7200电感耦合等离子体原子发射光谱（Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectroscopy, ICP-AES）进行测定。表1所示为ZL205A合金材料化学成分测试结果，表2所示为ZL205A合金材料T6热处理制度工艺参数。

采用砂纸和金刚石抛光剂对ZL205A合金试块进行研磨与抛光，然后采用Keller试剂进行腐蚀，溶液体积配比为HF∶HCl∶HNO_3∶H_2O=2∶3∶5∶190，腐蚀时间为4~6 s，利用ZeissScope-A1型光学显微镜观察合金的显微组织。SEM测试设备为FEI Inspect F50，加速电压为0.01~30 kV，二次电子图像分辨率为0.5 nm（15 kV）。采用FEI nano 450型场发射扫描电子显微镜观察室温拉伸试样断口形貌，工作电压15 kV，工作距离为10~15 mm，工作电流为55~60 μA，采用能谱仪（Energy Dispersive Spectroscopy，EDS）对断口表面元素分布进行定量标定。利用线切割切取T6热处理态合

表1 ZL205A合金材料化学成分
Tab. 1 Chemical composition of the ZL205A alloy w_B/%

Cu	Mn	Cd	Ti	V	Zr	B	Al
5.26	0.43	0.18	0.23	0.16	0.21	0.03	余量

表2 ZL205A铝合金T6热处理工艺参数
Tab. 2 The T6 heat treatment process parameters of the ZL205A alloy

项目	参数
入炉温度/℃	<300
固溶保温温度/℃	538 ± 5
固溶保温时间/h	10 ± 2
淬火水温/℃	40~60
淬火转移时间/s	≤20
入炉温度/℃	< 100
时效保温温度/℃	175 ± 5
时效保温时间/h	6 ± 2
冷却方式	空气冷却

金试样，厚度约0.5 mm；再用砂纸磨至厚度约40 μm，选取直径为3 mm的试样在Gatan Model 695 PIPS II型离子减薄仪上利用氩离子进行减薄。减薄参数如下：离子束能量为5 keV，研磨角度为 ± 8°，直至形成初始孔洞；然后调整离子束能量为4 keV，研磨角度为 ± 6°，继续减薄并扩大孔洞。减薄过程用液氮冷却，减薄温度为–99 ℃。采用Talos F200X G2型透射电子显微镜观察合金的组织形貌，并进行选区电子衍射（Selected Area Electron Diffraction，SAED），工作电压为200 kV。将力学性能拉伸试棒按照GB/T 228.1—2021加工成*Φ*5 mm标准室温拉伸试样，利用Instron 5982型万能试验机按照GB/T 228.1—2021测试合金的室温拉伸性能，拉伸速度为1.5 mm/min，拉伸试样尺寸见图1。

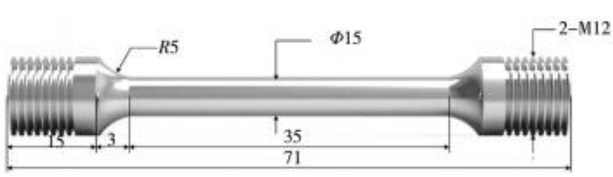


图1 力学性能拉伸试样尺寸图
Fig. 1 The dimensions of the mechanical property tensile specimen

1.2 ZL205A 骨架铸件低压铸造工艺设计

图2为ZL205A骨架铸件结构示意图。ZL205A骨架铸件外廓尺寸为1 387 mm × 90 mm × 296 mm，两侧壁厚为8~15 mm，内腔有两处130 mm × 90 mm × 42 mm的厚大结构，铸件技术指标要求为HB 963 Ⅱ类铸件，不允许存在热裂缺陷，本体切取试样抗拉强度≥450 MPa，屈服强度≥400 MPa，材料伸长率≥5%。铸件上表面开口较多，由于骨架内腔存在多处纵横隔筋，在纵横筋与隔板交接位置存在较多热节区域；两侧挂点区域存在厚大热节区，在内腔壁厚过渡区域存在多处小热节区域；ZL205A骨架铸件同时凝固或顺序凝固实施难度较大。

图2 ZL205A骨架铸件结构示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the ZL205A frame casting

考虑到ZL205A骨架铸件的结构特点，拟采用缝隙式浇注系统，通过在骨架铸件两侧设置横浇道与多个补缩浇道，采用低压铸造工艺成形铸件。ZL205A骨架铸件可采用水平浇注或垂直浇注两种工艺，分析认为采用后者时可在铸件两侧设置缝隙立筒浇注系统，使热量平衡分布，有利于铝液充填铸型、顺序凝固、排气和浮渣；同时有利于在型芯上采用激冷砂和冷铁等工艺措施，调节铸件局部厚大部位的冷却速度，获得致密的铸态组织；利于制作整体型芯，确保铸件尺寸的精度；且利于造型、下芯与合箱。

ZL205A骨架铸件缝隙式浇注系统由直浇道、横浇道、内浇道和缝隙浇道组成，为设计底注式浇注成形工艺方案，缝隙浇道设计参数按式（1）—（4）进行设定。缝隙浇道总宽度$\sum a_m$按照式（1）进行设定，单个缝隙浇道宽度a按照式（2）进行设定，缝隙浇道数量n按照式（3）进行设定，缝隙浇道的长度b（从铸件本体到缝隙浇道立筒的距离）和缝隙浇道立筒直径D按式（4）进行设定，二者通常取值为20~35 mm。式（1）中，P_Φ为铸型型腔截面总体周长；式（2）中，δ为缝隙浇道处铸件壁厚。按照式（1）—（4）的设定条件，设计了ZL205A骨架铸件低压铸造工艺，如图3所示，共设计了19个缝隙式内浇道，缝隙式内浇道间距约为240~300 mm，单个缝隙浇道宽度a取值为缝隙浇道处铸件壁厚δ的1.2倍，缝隙式浇道立筒直径D取值为缝隙浇道宽度a的4倍，缝隙式浇道立筒采用上大下小的结构布局，拔模斜度取为1.2°。

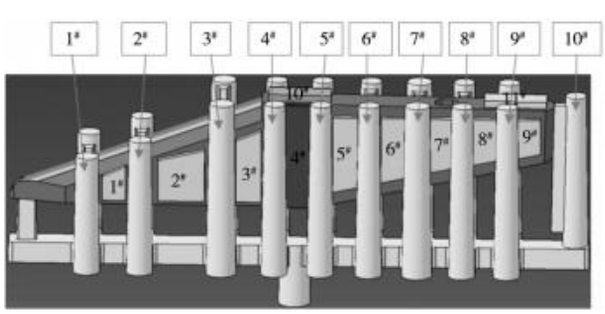


图3 ZL205A骨架铸件低压铸造工艺设计示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the low-pressure casting process design of the ZL205A frame casting

$$\sum a_m=(0.008\sim0.012)P_\Phi \quad (1)$$

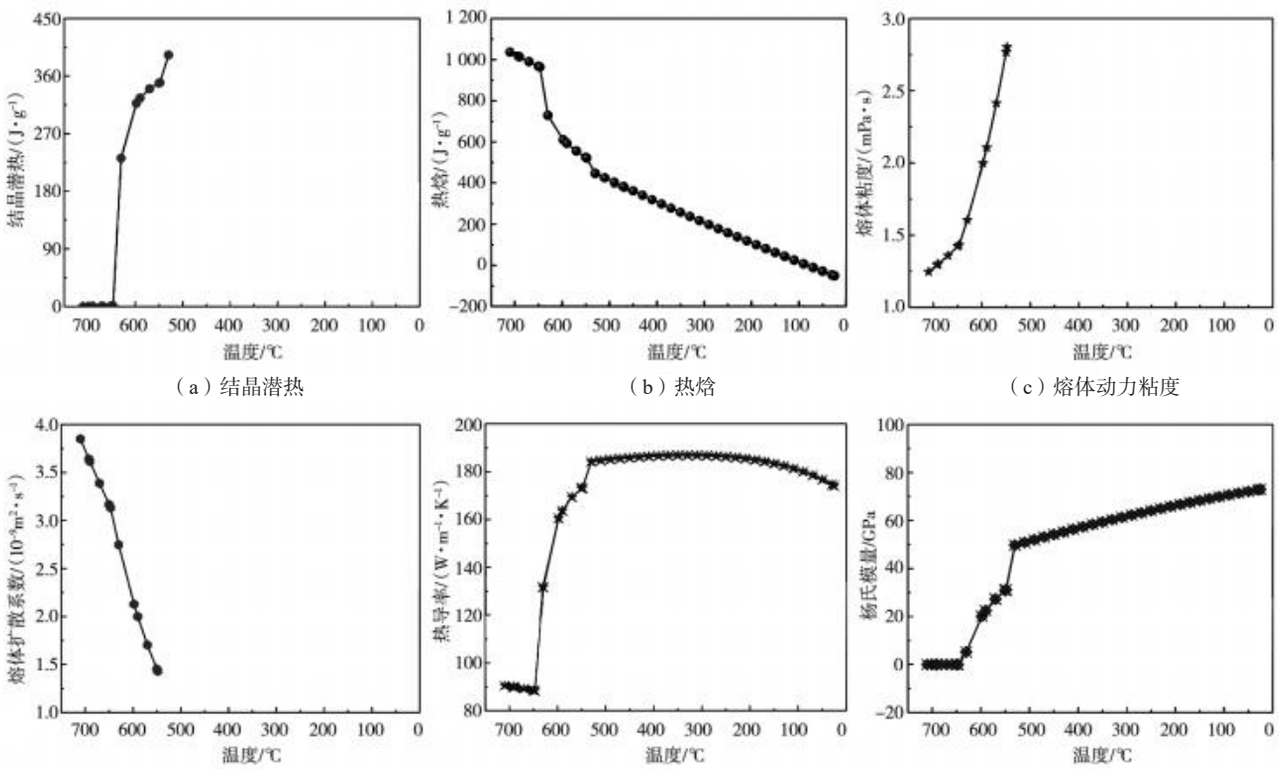
$$a\leqslant(0.7\sim1.0)\delta,\ 当\delta\geqslant10\ mm;\ a=(1.0\sim1.5)\delta,\ 当\delta\leqslant10\ mm \quad (2)$$

$$n=\sum a_m/a \quad (3)$$

$$b=D\geqslant4a \quad (4)$$

1.3 仿真参数设置

骨架铸件材料为ZL205A合金，其液相线温度T_L和固相线温度T_S分别为633 ℃和544 ℃，图4所示为ZL205A合金的热物性参数。为保证数值仿真计算精度，ZL205A骨架铸件网格剖分尺寸设置为2 mm，树脂砂铸型网格剖分尺寸设置为6 mm，网格剖分总数量为3 126 452，低压铸造充型初始温度为710 ℃ ± 10 ℃，树脂砂铸型初始温度为25 ℃，冷铁材质为铸铁。铸件与铸型界面换热系数为450 W·m^{-2}·K^{-1}，铸件与冷铁界面换热系数为1 200 W·m^{-2}·K^{-1}，冷铁与铸型界面换热系数为200 W·m^{-2}·K^{-1}。低压铸造成形共包括升液阶段、充型阶段、结壳增压阶段和结晶阶段四个过程，表3所示为ZL205A骨架铸件低压铸造加压工艺参数。图5为ZL205A骨架铸件网格剖分完成后的模型示意图。



（a）结晶潜热　（b）热焓　（c）熔体动力粘度

（d）熔体扩散系数　（e）热导率　（f）杨氏模量

图4　ZL205A铝合金热物性参数

Fig. 4 The thermal physical property parameters of the ZL205A aluminum alloy

图5　ZL205A骨架铸造工艺网格剖分示意图

Fig. 5 Schematic diagram of grid division of the ZL205A frame casting process

表3　ZL205A骨架铸件低压铸造加压工艺参数

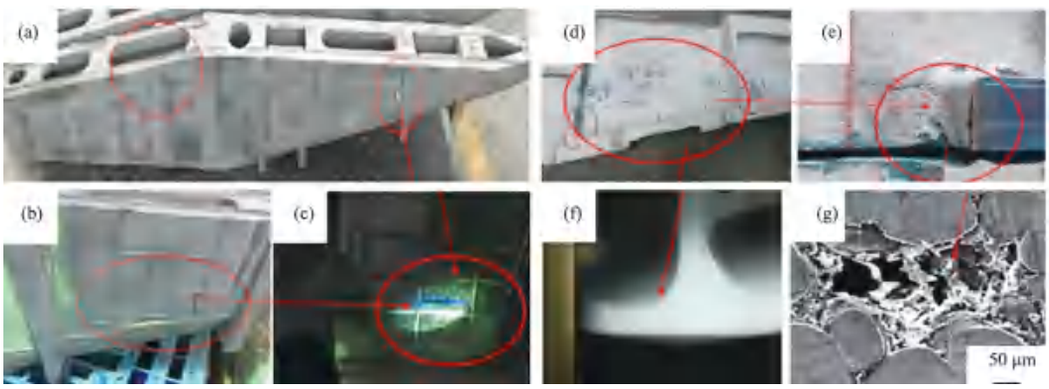
Tab. 3 The pressure process parameters for the low-pressure casting of the ZL205A frame workpiece

升液压力/kPa	升液速度/(kPa·s^{-1})	充型压力/kPa	充型速度/(kPa·s^{-1})	结壳增压压力/kPa	结壳增压速度/(kPa·s^{-1})	结晶增压压力/kPa	结晶增压速度/(kPa·s^{-1})	结晶时间/s
25	1.0	35	0.8	2	1.0	15	1.5	400

2 骨架铸件低压铸造工艺试制分析

2.1 骨架铸件低压铸造工艺试制冶金缺陷分析

按照图3所示低压铸造工艺设计方案，开展了ZL205A骨架铸件低压铸造成形工艺试制，试制结果见图6。由图6可知，ZL205A骨架铸件采用现有低压铸造工艺成形时，存在热裂，如图6（c）所示，疏松，如图6（f）所示的冶金缺陷。热裂缺陷主要分布于骨架铸件下端加强筋与蒙皮交接区域，见图6（b）位置；疏松缺陷主要分布在内腔壁厚过渡区域，见图6（e）位置。试制结果存在的热裂及疏松缺陷，无法满足技术指标要求。



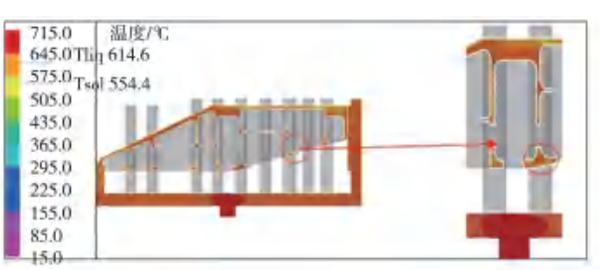
（a）骨架铸件实物；（b）热裂缺陷；（c）热裂缺陷荧光渗透检测；（d）疏松缺陷；
（e）疏松缺陷放大示意图；（f）疏松缺陷X射线无损探伤；（g）疏松缺陷SEM形貌观察

图6 ZL205A骨架铸件低压铸造成形工艺试制冶金缺陷分析

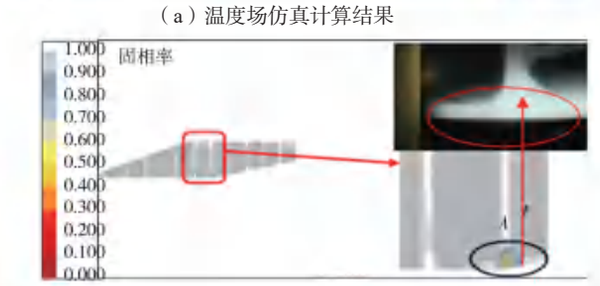
Fig. 6 Metallurgical defects analysis in the trial production of the ZL205A frame casting formed by low-pressure casting process

2.2 骨架铸件低压铸造工艺试制凝固仿真分析

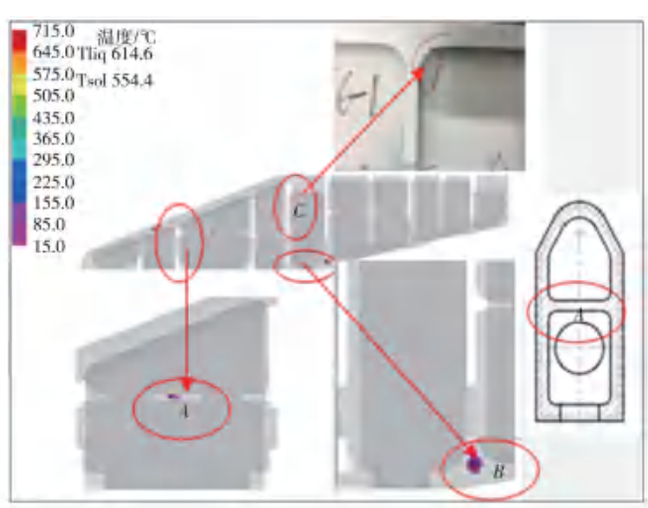
采用Pro-CAST铸造工艺仿真软件对ZL205A骨架铸件低压铸造凝固过程进行仿真计算分析，结果见图7。由图7（a）、（b）可知，凝固冷却过程*A*区域温度始终高于其他区域，为过热区域和最后凝固区域，极易形成孤立的液-固两相区，此处合金熔体历经液态收缩、凝固收缩和固态收缩，体积收缩持续增加且一直未得到有效补缩，易形成疏松缺陷，对应于图6（f）位置。结合图7（c）可知，ZL205A骨架铸件凝固收缩时，*C*区域为最后凝固区域，在凝固中后期得不到有效的熔体补缩，易形成孤立的液-固两相区。同时在凝固末期骨架铸件固态收缩时，受整体型芯刚度约束影响，固态收缩受阻，易在铸件/铸型界面产生较大的热应力，当热应力峰值超出ZL205A合金高温屈服极限时，会产生微裂纹，由于该区域处于液-固两相区且没有合金熔体进行有效补缩，导致微裂纹持续延伸扩



（a）温度场仿真计算结果



（b）固相率场仿真计算结果



（c）疏松和热裂缺陷机理分析

图7 ZL205A骨架铸件低压铸造凝固温度场仿真计算结果

Fig. 7 Solidification temperature field simulation results of the ZL205A frame casting formed by low-pressure casting process

展，最终产生严重的热裂缺陷。综合图7所示凝固温度场仿真计算结果可知，为解决ZL205A骨架铸件热裂、疏松冶金缺陷，需增加厚大区域和最后凝固区域的压力补缩，通过有效的熔体补缩减少疏松缺陷，消除凝固热裂。

3 ZL205A骨架铸件成形工艺设计仿真优化

3.1 ZL205A 骨架铸件低压铸造工艺设计优化

结合图7所示凝固温度场仿真计算结果，可知ZL205A骨架铸件*B*区域疏松缺陷主要成因是*B*区域为最后凝固部位，凝固末期未得到有效的补缩；*A*区域疏松缺陷是由于现有铸造工艺设计缝隙浇道间距过大，补缩不足造成；*C*区域加强筋两侧存在较大壁厚差异，低压铸造充型时合金熔体持续从第4道缝隙浇道充填，造成*C*区域持续过热产生疏松缺陷；且持续的过热导致合金材料始终处于高温状态，材料屈服极限较低，由于整体型芯刚度约束产生的微裂纹快速扩展，产生热裂。在第2道和第3道缝隙浇道中间增加新的缝隙浇道（第11道）对*A*区域在凝固中后期进行有效的压力补缩；同时取消现有的第3道和第4道缝隙浇道，在骨架铸件挂点中间新增缝隙浇道（第12道），在*B*区域增设激冷冷铁，提高*B*区域的凝固冷速，在压力补缩下提前凝固，消除疏松缺陷，如图8所示，设计了新的低压铸造工艺方案。

采用图8所示低压铸造工艺开展了凝固固相率场分布仿真计算和实物浇注试验，结果见图9。由图9（a）凝固固相率场仿真计算结果可知，低压铸造工艺设计优化方案1凝固过程仍存在凝固热节区域，见图9

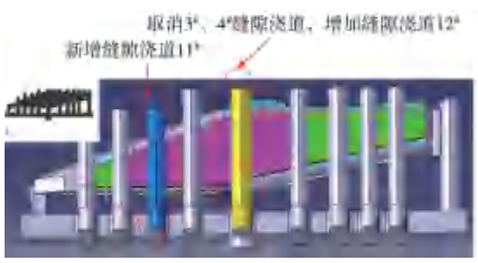
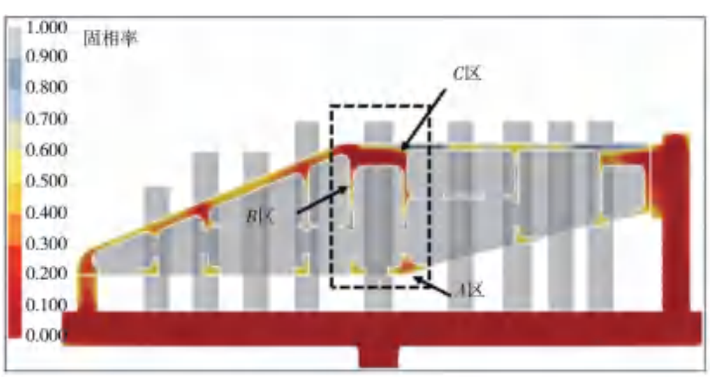
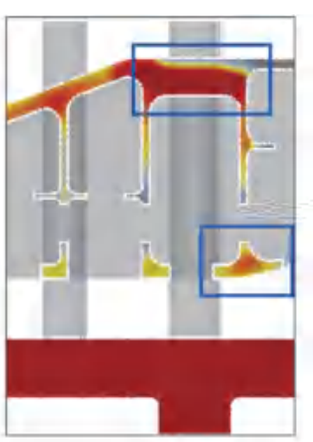


图8 ZL205A骨架铸件低压铸造工艺设计优化方案1

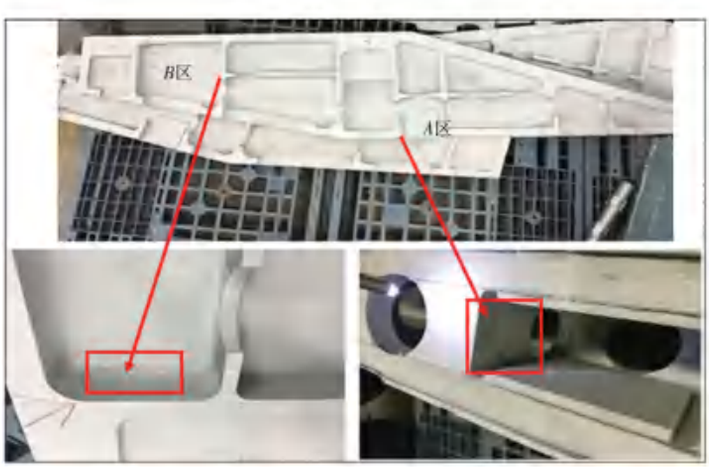
Fig. 8 The low-pressure casting process design optimization scheme 1 of the ZL205A frame casting



（a）固相率场仿真计算结果



（b）凝固热节区域分析



（c）实物浇注缺陷分布

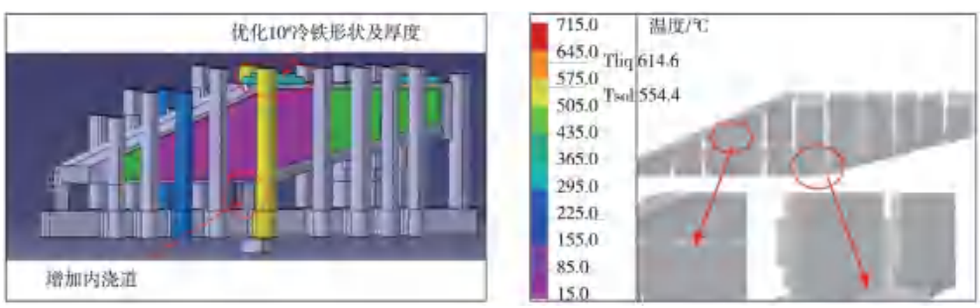
（d）实物浇注剖切结果

图9 低压铸造工艺设计优化方案1凝固固相率场仿真计算与实物浇注试验结果

Fig. 9 Simulation calculation results of solidification solid fraction field and physical casting test results for the low-pressure casting process design optimization scheme 1

（a）箭头所示的*A*区、*B*区和*C*区。其中*C*区位于骨架铸件顶端，无有效的压力补缩且为厚大区域，在整个凝固过程始终处于最后凝固部位，得不到有效的熔体补缩，易产生疏松缺陷。*B*区位于加强筋和蒙皮交接区域，新增的缝隙浇道12#在凝固末期不能进行有效的压力补缩，形成狭长的热节区域，凝固末期易产生疏松缺陷。*A*区域位于骨架铸件底端，缝隙浇道在凝固末期无法进行压力补缩，形成较大的热节圆，铸件组织无法得到有效保证。结合图9（b）可知，凝固固相率场分布存在多处孤立液-固两相区，见图9（b）线框区域，在凝固末期得不到压力补缩，将产生疏松、缩孔缺陷。按照低压铸造工艺设计优化方案1共生产了4件ZL205A骨架铸件，经X射线无损探伤检验发现在骨架铸件*A*区、*B*区和*C*区观察到了较为严重的疏松缺陷，见图9（c）和图9（d）箭头与线框位置。结合图9所示凝固固相率场仿真计算和实物浇注检测结果可知，造成ZL205A骨架铸件疏松、缩孔缺陷的根源在于孤立的液-固两相区，可通过在存在疏松、缩孔缺陷的*A*区、*B*区和*C*区增设内浇道，凝固末期进行有效的压力补缩消除缺陷；同时在厚壁*C*区增设激冷冷铁，提高冷却速度，减小热节区域面积，改善ZL205A骨架铸件的质量。

根据图9所示低压铸造工艺设计优化方案1实物浇注结果，对低压铸造工艺设计方案作了进一步优化，如图10所示。在低压铸造工艺设计优化方案1的基础上，在存在疏松缺陷的*A*区和*B*区，增加了内浇道，可在凝固末期对*A*区和*B*区进行有效的压力补缩；同时在存在疏松缺陷的*C*区，增加了10#冷铁厚度并加大了冷铁宽度，提高了冷铁的激冷效果，如图10（a）所示。由图10（b）所示的疏松缺陷仿真计算结果可知，采用低压铸造工艺设计优化方案2有效消除了ZL205A骨架铸件的疏松缺陷，冶金质量显著提高。现场采用低压铸造工艺设计优化方案2共完成了20件ZL205A骨架铸件的生产试制，19件一次探伤合格。



（a）低压铸造工艺设计优化方案2　　（b）疏松缺陷仿真计算结果

图10　低压铸造工艺设计优化方案2与疏松缺陷仿真计算结果

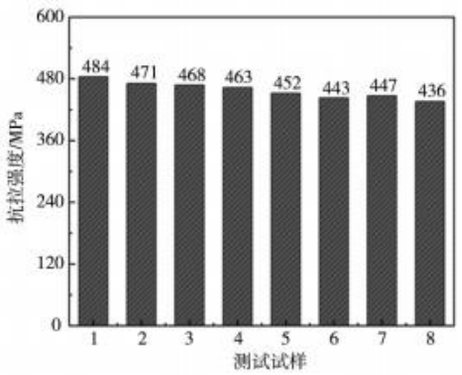
Fig. 10 The low-pressure casting process design optimization scheme 2 and the simulation calculation results of porosity defects

3.2　ZL205A 骨架铸件组织性能测试

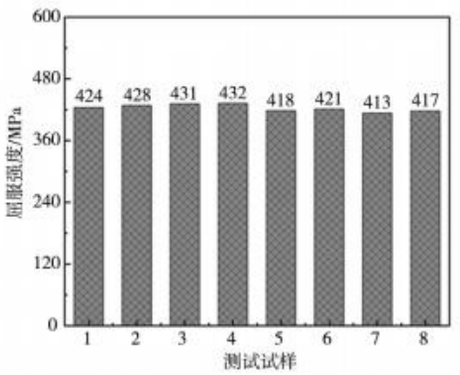
对采用低压铸造工艺设计优化方案2生产的ZL205A骨架铸件开展了本体试样力学性能测试，其中测试试样1~4为ZL205A骨架铸件蒙皮区域，5~8测试试样为ZL205A骨架铸件厚壁区域，测试结果见图11。由图11可知，ZL205A骨架铸件蒙皮区域室温抗拉强度、屈服强度与材料伸长率平均值分别为471.5 MPa、428.8 MPa和7.9%；ZL205A骨架铸件厚壁区域室温抗拉强度、屈服强度和材料伸长率分别为444.5 MPa、417.3 MPa与5.6%，均满足技术指标要求。

图12所示为ZL205A骨架铸件材料微观组织与断口形貌表征测试结果。如图12（a）所示，ZL205A厚壁部位因壁厚尺寸大、凝固冷速慢，平均铸态晶粒尺寸约为117 μm；蒙皮部位凝固冷速高、晶粒尺寸较为细小，平均铸态晶粒尺寸约为89 μm。由图12（c）可知，厚壁部位因凝固冷速低，铸态组织中Cu、Mn元素富集程度较高，经T6热处理后在晶界上析出的强化相数量较多；蒙皮区域凝固冷速高，铸态组织中的Cu、Mn元素富集程度低于厚壁区域，T6热处理后晶界区域析出强化相数量略少，见图12（d）。结合图12（e）和图12（f）所示的断口形貌测试结果可知，ZL205A骨架铸件厚壁区域和蒙皮区域T6热处理态材料断裂机制均为“沿晶断裂+韧窝断裂”，以韧窝断裂机制为主。厚壁区域因铸态晶粒组织粗大，可在断口表面观察到明显的沿晶撕棱带，见图12（e）箭头位置；蒙皮区域铸态晶粒尺寸细小，未观察到明显的沿晶撕棱带，断口表面可观察到尺寸大小不一的微观韧窝，见图12（f）箭头所示。

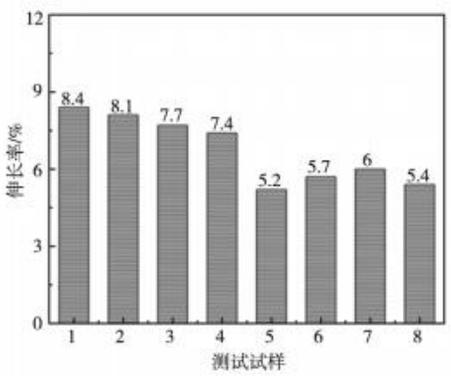
对图12（c）矩形线框所示晶界析出强化相进行形貌及EDS表征，结果见图13（a）与图13（b），厚壁区域T6态晶界析出强化相形貌呈骨骼状，EDS表征显示强化相主要含Cd、Ti和Cu元素，其中Cu元素质量分数



（a）抗拉强度



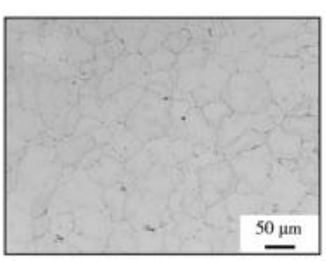
（b）屈服强度



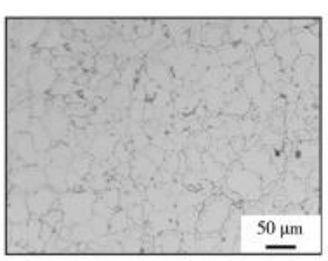
（c）伸长率

图11 ZL205A骨架铸件力学性能测试结果

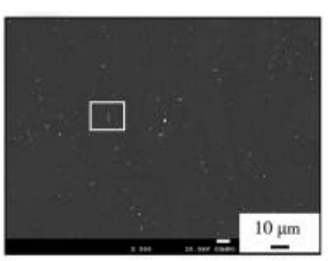
Fig. 11 The mechanical property test results of the ZL205A skeleton casting



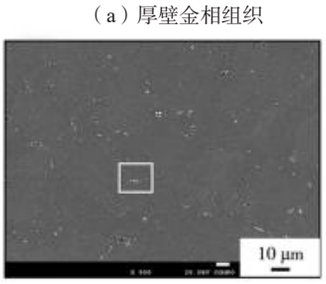
（a）厚壁金相组织



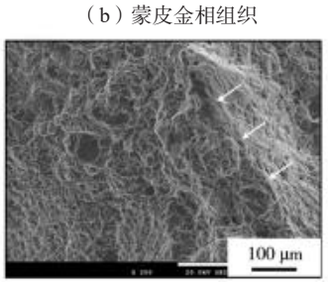
（b）蒙皮金相组织



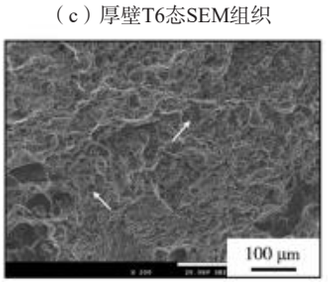
（c）厚壁T6态SEM组织



（d）蒙皮T6态SEM组织



（e）厚壁断口形貌



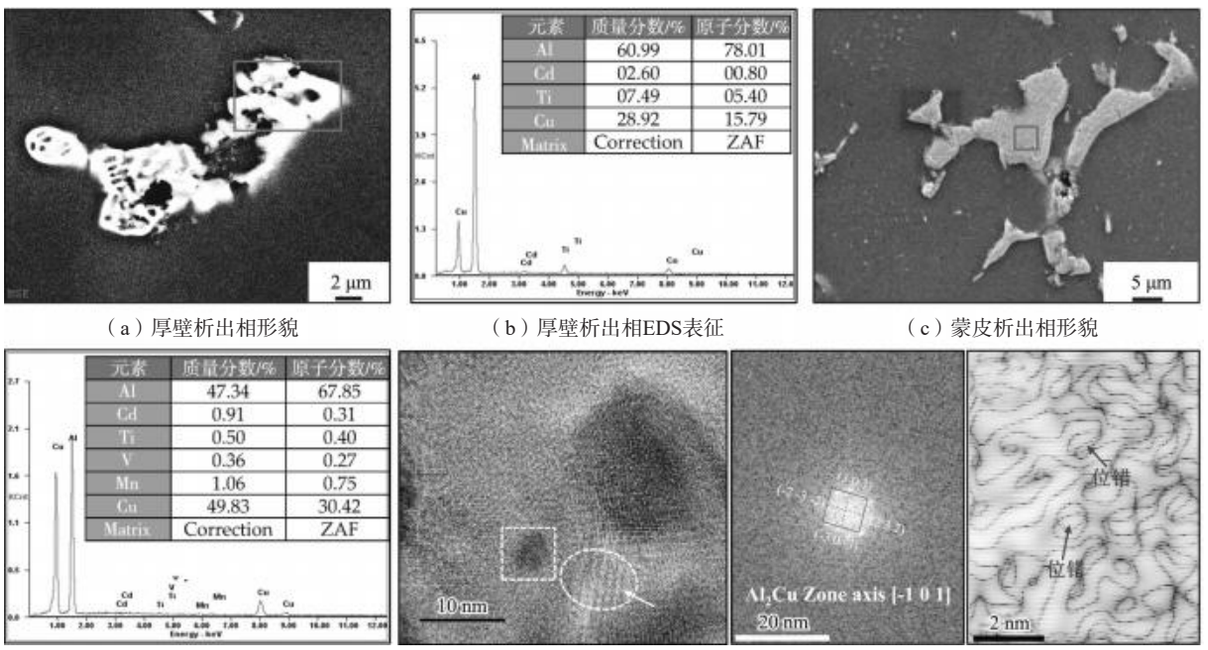
（f）蒙皮断口形貌

图12 ZL205A骨架铸件材料微观组织与断口形貌表征测试结果

Fig. 12 The microstructure and fracture morphology characterization results of the ZL205A skeleton casting

高达28.92%，可知，厚壁区域T6态晶界析出强化相主要为Al_2Cu相。图13（c）和图13（d）所示为蒙皮区域T6态析出强化相形貌及EDS表征结果，见图12（d）矩形线框位置。如图13（d）所示，蒙皮区域T6态析出强化相形貌呈树枝状，EDS表征结果显示析出强化相含Cd、Ti、V、Mn与Cu元素，其中Cu元素为主元素，含量高达49.83wt.%，可得知蒙皮区域T6态晶界主析出强化相也为Al_2Cu相。

对蒙皮区域Al_2Cu析出强化相进行HRTEM分析，结果如图13（e）。在HRTEM明场像中可观察到明显的析出相，见图13（e）矩形线框所示，对矩形线框区域析出相进行衍射斑标定分析，析出相为Al_2Cu相，且



（a）厚壁析出相形貌　（b）厚壁析出相EDS表征　（c）蒙皮析出相形貌

（d）蒙皮析出相EDS表征　（e）析出相HRTEM形貌　（f）Al_2Cu析出相HRTEM分析　（g）位错形貌表征

图13　ZL205A骨架铸件材料EDS与HRTEM微观组织测试结果

Fig. 13 The EDS analysis and HRTEM microstructure examination results of the ZL205A frame casting

Al_2Cu[-101]//α-Al[111]。如图13（e）箭头位置进行反傅里叶变换（Inverse FFT）分析，可知在析出强化临近区域观察到了明显的位错线与位错环，见图13（g）箭头所示。结合图13（e）可知，当位错线滑移至较小尺寸Al_2Cu强化相时，位错线可直接切割强化相，使强化相与α-Al一起发生塑性变形；图13（e）矩形线框所示为小尺寸强化相；当大尺寸Al_2Cu强化相阻碍位错线滑移时，位错线无法直接切割Al_2Cu强化相，只能通过弯曲绕过强化相继续滑移，在Al_2Cu强化相周边形成一定数量的位错环。位错在晶界、析出强化相前堆积，内应力不断升高，阻碍后续位错开动，材料强度与塑性得到明显提升。结合图13测试结果可知，ZL205A骨架铸件力学性能强化机制主要为析出强化与位错强化，可通过提高ZL205A骨架铸件厚壁区域的凝固冷速，在保证冶金质量的前提下，细化厚壁区域的铸态晶粒尺寸，提高Al_2Cu相析出数量及密度，进一步提升铸件的本体力学性能。

4　结论

（1）ZL205A骨架铸件采用垂直缝隙式浇道低压铸造工艺成形时，内腔壁厚过渡区域受孤立液-固两相区影响产生疏松缺陷，受整体型芯刚度约束影响，骨架铸件下端加强筋与蒙皮交接区域固态收缩受阻，铸件/铸型界面热应力叠加峰值超出材料高温强度极限，诱发产生热裂缺陷。

（2）通过增加内浇道补缩并调整顶端冷铁外形及厚度，有效减小了孤立液-固两相区面积，补缩浇道可在凝固中后期实施有效的压力补缩，实现了合金熔体对内腔壁厚过渡区域和下端加强筋与蒙皮交接区域的平稳充型与顺序补缩，铸件缩松、缩孔缺陷转移至缝隙浇道，冶金质量得到显著提升。

（3）蒙皮区域本体试样力学性能高于厚壁区域，T6态室温抗拉强度、屈服强度与材料伸长率平均值达471.5 MPa、428.8 MPa和7.9%；受凝固冷却速度影响，蒙皮区域和厚壁区域平均铸态晶粒尺寸分别为89 μm和117 μm，材料断裂机制为沿晶断裂+韧窝断裂，以韧窝断裂机制为主，断口表面可观察到明显的沿晶撕棱带与尺寸大小不一的微观韧窝。

（4）T6热处理态材料强化机制主要为析出强化与位错强化，通过提高厚壁部位凝固冷却速度，可在保证冶金质量基础上细化铸态晶粒尺寸，提高Al_2Cu主强化相析出数量及密度，进一步提升ZL205A骨架铸件本体的力学性能。

参考文献：

[1] 张钰. 铝合金在航天航空的应用 [J]. 铝加工，2009（3）：50–53.

[2] 齐忠原，巫瑞智，王国军，等. 铝合金在船舶和海洋工程中的应用 [J]. 轻合金加工技术，2016，44（1）：12–18.

[3] 陈亚莉. 铝合金在航空领域中的应用 [J]. 有色金属加工，2003，32（2）：11–14.

[4] 石永久，程明，王元清. 铝合金在建筑结构中的应用与研究 [J]. 建筑科学，2005（6）：7–11.

[5] 刘斌，郑秋，党朋，等. 铝合金在架空导线领域的应用及发展 [J]. 电线电缆，2012（4）：10–15.

[6] 熊艳才，刘伯操. 铸造铝合金现状及未来发展 [J]. 特种铸造及有色合金，1998（4）：1–4.

[7] 吕杰，刘伯操，杨凯，等. 高强韧铸造铝合金 [J]. 铸造，2000，49（2）：66–69.

[8] 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.

[9] 贾泮江，陈邦峰. ZL205A合金高强优质铸件在大飞机上的应用 [J]. 材料工程，2009（1）：77–80.

[10] 张华炜，刘悦，范同祥. 铸造耐热铝合金的研究进展及展望 [J]. 材料导报，2022，36（2）：153–161.

[11] 樊振中，徐秀利，王玉灵，等. 熔模精密铸造技术在航空工业的应用及发展 [J]. 特种铸造及有色合金，2014，34（3）：285–289.

[12] 章舜如，彭金贵. 强五机ZL201合金大型吊挂梁的铸造 [J]. 特种铸造及有色合金，1991（6）：31–32.

[13] 司金梅，吕三雷，李晶晶，等. 基于工艺仿真和3DP砂型的大型薄壁电子机箱骨架制造 [J]. 特种铸造及有色合金，2020，40（12）：1384–1387.

[14] 师素粉，樊红军，张建平，等. 大型复杂ZL205A铝合金骨架铸造工艺设计与优化 [J]. 铸造技术，2016，37（9）：2021–2024.

[15] 于海军，张喆，左强. 骨架铸件铸造工艺的研究 [J]. 铸造技术，2017，38（4）：960–962.

[16] 杜旭初，洪润洲，刘建军，等. 大型复杂高强度ZL205A铝合金骨架铸件的研制 [J]. 铸造，2014，63（4）：371–374.

[17] 柳百成. 铸件充型凝固过程数值模拟国内外研究进展 [J]. 铸造，1999，48（8）：40–45.

[18] 贾良荣，熊守美，冯伟明，等. 压力铸造充型过程流动与传热数值模拟的研究 [J]. 清华大学学报（自然科学版），2001（2）：8–11.

[19] 廖敦明，林汉同，刘瑞祥，等. 铸造热应力场数值模拟研究的最新进展 [J]. 现代铸铁，2000（4）：4–7.

[20] 许庆彦，冯伟明，柳百成，等. 铝合金枝晶生长的数值模拟 [J]. 金属学报，2002（8）：799–803.

[21] 殷亚军，刘振伟，张勇佳，等. 铸造数值模拟软件技术及应用进展 [J]. 特种铸造及有色合金，2023，43（10）：1297–1311.

[22] 艾雨蒙，游志勇，刘世龙，等. 基于砂型3DP打印技术的壳体低压铸造工艺开发与验证 [J]. 铸造，2024，73（8）：1159–1164.

（编辑：刘冬梅，ldm@foundryworld.com）