ZL205A 真空调压铸造有效应力控制与性能研究

邓攀科，杨智勇，韩建民，李卫京，孙　友
（北京交通大学机械与电子控制工程学院，北京 100044）

摘要：为控制铸件在真空调压铸造凝固成形过程中平均应力大小，避免热裂发生，利用有限元分析软件ProCAST对ZL205A铝合金进行了温度场与应力场模拟，并针对浇注温度、模具预热温度、换热系数和模具壁厚等铸造应力影响因素展开研究，得到合理的铸造工艺，并进行试验验证，测试铸件性能。结果表明：模具预热温度、金属型换热系数、模具厚度和金属液浇注温度对铸件的影响程度由高到低依次减小，在试验条件下得到最佳工艺参数：浇注温度为700 ℃，模具预热温度为350 ℃，模具壁厚150 mm，换热系数为1000 W/m^2·K。通过试验验证，该工艺所得铸件组织均匀，表面光洁，抗拉强度可达525 MPa，屈服强度达462 MPa。

关键词：真空调压成形；铝合金；金属型；数值模拟；应力控制；力学性能

与传统砂型铸造工艺相比，真空调压成形工艺具有提高铸件致密度，提升除渣除气性能等特点[1-3]，金属型铸造具有工艺性能好、尺寸精度高、表面质量好等优点[4-5]，采用真空调压金属型铸造成形工艺在实际生产中对提升铸件性能有极大的帮助[6]。ZL205A铝合金作为我国自主研发的高强度铸造铝合金广泛应用于航空航天、轨道交通等领域[7-8]。由于受合金成分的影响，ZL205A 合金的缺点在于其结晶温度范围较宽，导致其流动性较差，晶界存在偏聚，热裂倾向性较大[8-9]，因此合理的铸造工艺设计对减小铸造应力，预防热裂发生有重要作用。计算机数值模拟技术经过长时间的发展，已广泛应用到各行各业[10]。利用数值模拟技术可实现计算机模拟生产，优化工艺，节约成本。

国内外学者针对铸造工艺和生产过程中的铸造应力及缺陷进行了大量地研究，潘婷婷[11]等研究了浇注温度、换热系数对Al-Si合金底漏式真空吸铸有效应力分布的影响；胡悦高[12]等研究了浇注温度与铸型温度对6082铝合金热裂倾向的影响；S. K. Rathi等人[13]研究了模具温度对Al-Si-Cu合金热裂的影响；H. Akhyar[14]等人研究了浇注温度对Al-Si合金热裂敏感性的影响；蔡庆[15]等人利用ProCAST数值模拟研究了ZL205A重力浇注热裂问题，预测了热裂发生的位置。但是目前对铝铜合金真空调压金属型凝固过程中有效应力控制的研究较少，本文通过真空调压金属型成形工艺对ZL205A合金进行研究，利用ProCAST有限元凝固模拟软件对铸件成形过程的温度场和应力场进行模拟，对影响铸造应力的浇注温度、模具预热温度、模具壁厚和模具换热系数进行研究，并进行试验验证。

1　工艺设计与有限元数值模拟

1.1　工艺介绍及铸件设计

真空调压成形的工作原理是利用上下压室气压差将金属液从坩埚压入模具成形[16]，如图1所示。其优点在于：上压室抽真空，可对铝液进行更好的除气作用，下压室调压可以提升铸件致密度，控制铸件充型速度。针对该工艺设计金属型调压铸造试验铸件如图2所示。

作者简介：
邓攀科（1993–），男，研究生，研究方向为铝合金材料、材料结构工艺协同设计。E-mail:panke_deng@163.com
通讯作者：
杨智勇，男，副教授。E-mail:zhyyang@bjtu.edu.cn

中图分类号：TG292；TM743
文献标识码：A
文章编号：1001-4977（2019）12-1368-06

收稿日期：
2019–08–05 收到初稿，
2019–09–27 收到修订稿。

1.2 有限元模拟

1.2.1 材料热物性参数

模拟及试验采用铝合金材料为ZL205A，其元素化学成分如表1所示。在进行数值模拟前处理阶段，需要对合金热物性参数进行设置与计算[17-18]。利用 ProCAST 软件中对材料热物性能的计算功能，对ZL205A合金热物性参数进行计算，建立该材料部分性能数据库，如表2所示。

1.2.2 边界条件及工艺参数

真空调压成形的边界条件主要包括金属型的预热温度、浇注温度、充型压力、充型时间、保压压力、保压时间、换热系数等。根据铸造手册[19]选用充型压力为0.118 MPa，充型时间为2 s，保压压力为0.16 MPa，保压时间为45 s。为研究的预热温度、浇注温度、换热系数及模具壁厚对有效应力的影响，设置工艺参数试验安排如表3所示，总共进行11组有限元模拟分析试验。

2 数值模拟结果及分析

将三维模型导入前处理软件，进行二维网格与三维网格划分后，按照工艺参数设置边界条件，进行凝固模拟计算。在确保冷却顺序合理，无缩松缩孔缺陷后，进行有效应力计算，得到模拟结果如图3所示。为方便有效应力比较与分析，选择试样相同位置作为应力测试点展开研究。

2.1 模具预热温度对有效应力的影响

为研究模具预热温度对有效应力的影响，设置相同浇注温度为700 ℃，换热系数1 000 W/（m^2·K），模具壁厚80 mm，模具预热温度分别选择为150、250、350、450 ℃，即工艺参数试验安排表中第1、2、3、4组试验结果进行分析。

取相同温度下分析点的平均应力模拟结果，待应力值趋于稳定后取值，根据模拟结果曲线（图4）分析可知，铸件有效应力随模具温度升高而降低，当模具预热温度为150 ℃时，分析点有效应力最高达到233.65 MPa；模具预热温度为450 ℃时，有效应力最低为117.39 MPa。有效应力大小随模具温度减小趋势逐渐变缓，同时，模具温度越高，铸件凝固速度越慢。在实际生产过程中，模具预热温度过高容易导致铸件粘模、组织粗大等问题，同时降低模具寿命，增加能耗，因此将模具温度提升至350 ℃既可有效降低平均有效应力，又不会导致冷却时间过长，降低铸件组织性能和生产效率。

2.2 浇注温度对有效应力的影响

模具预热温度为350 ℃，模具壁厚为80 mm，换热系数为1000 W/（m^2·K），浇注温度选择680、700、

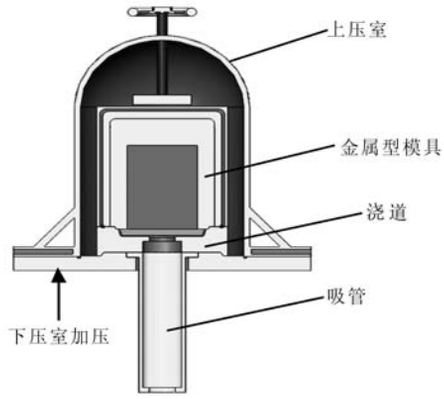


图1 真空调压金属型铸造原理

Fig. 1 Principle of vacuum pressure regulating metal mold casting

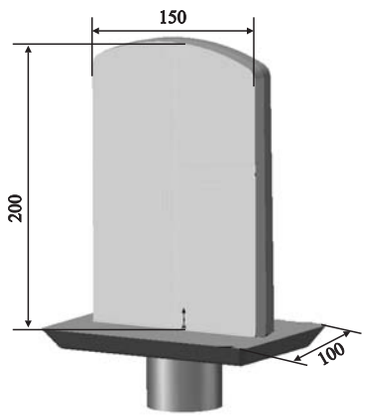


图2 铸件工艺设计示意图（质量：4.62 kg）

Fig. 2 Schematic diagram of casting process (casting weight: 4.62 kg)

表1 ZL205A合金化学成分

Table 1 Chemical composition requirements of ZL205A alloy w_B/%

Cu	Mn	Ti	V	Ni	其他
4~6	0.3~0.5	0.2	0.30	0.05	≤0.05

表2 ZL205A合金热物性参数

Table 2 Thermal property parameters of ZL205A alloy

温度/℃	杨氏模量/GPa	屈服强度/MPa	塑性模量/MPa	泊松比	粘性指数
25	65	235	3 650	0.344	50
150	63	220	3 025	0.344	20
350	43	100	2 100	0.346	4
450	29	65	1 050	0.361	3
550	15	20	350	0.380	2
647	0.05	5	0	0.5	0.05

720、740 ℃，即工艺参数试验安排表3中第3、5、6、7组试验结果进行分析。

由图5可知，在冷却到相同温度条件下，浇注温度从680 ℃开始，铸件平均有效应力随浇注温度呈现先减小后增大，再减小的趋势，其中当浇注温度为720 ℃时，有效应力最高达128.83 MPa，700 ℃时有效应力最小，为124.35 MPa。浇注温度对铸件有效应力的影响程度较小，适当提升浇注温度有利于减小有效应力。

2.3 换热系数对有效应力的影响

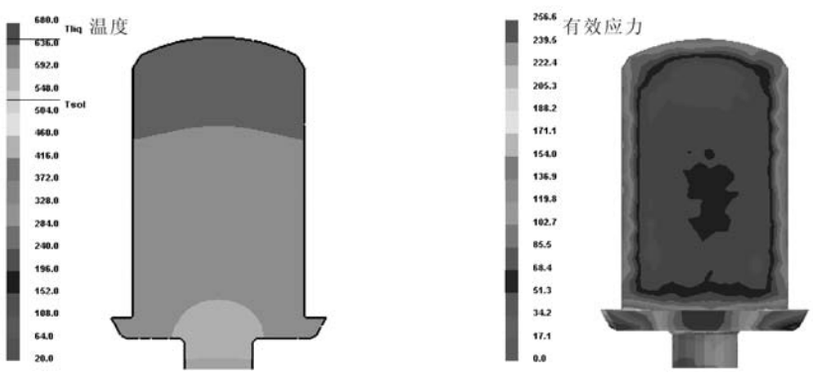
选择模具预热温度为350 ℃，模具壁厚为80 mm，浇注温度为700 ℃，换热系数分别选择为1 000、2 000、5 000 W/（m^2·K），在实际中对应换热系数的材料为45#钢、黄铜和紫铜。选择工艺参数试验安排表3中第3、10、11组分析。

由图6可以得出，有效应力随换热系数增大而增大，界面换热系数越大，冷却速率越快，应力随之增大。其中换热系数为5 000 W/（m^2·K）时，有效应力最大为131.21 MPa；换热系数为1 000 W/（m^2·K）时，有效应力最小为122.08 MPa。在金属型真空调压铸造过程中，换热系数对有效应力的影响成正相关，影响程度不高，因此选择换热系数较小的金属型模具在一定程度有利于减小铸件有效应力。

表3 被设计的11组工艺参数

Table 3 11 groups of designed process parameters for tests

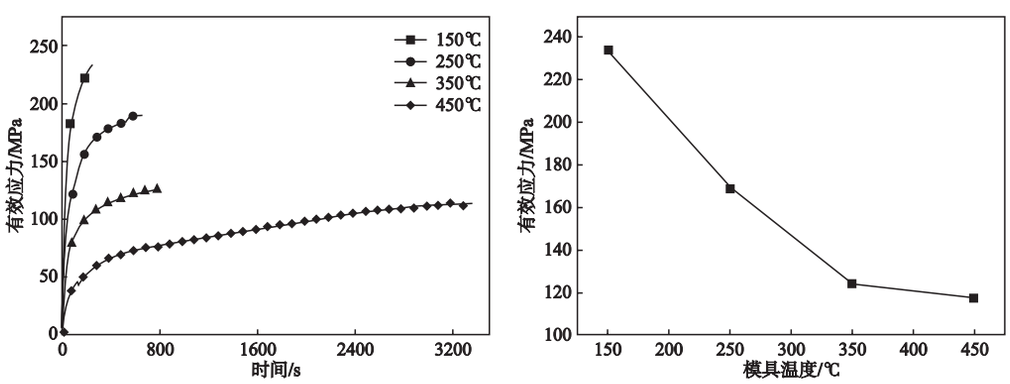
序号	浇注温度/℃	模具温度/℃	模具壁厚/mm	换热系数/（W·m^{-2}·K^{-1}）
1	700	150	80	1 000
2	700	250	80	1 000
3	700	350	80	1 000
4	700	450	80	1 000
5	680	350	80	1 000
6	720	350	80	1 000
7	740	350	80	1 000
8	700	350	30	1 000
9	700	350	150	1 000
10	700	350	80	2 000
11	700	350	80	5 000



（a）温度-时间云图　　（b）有效应力分布

图3 纵剖面铸造凝固温度-时间云图及有效应力分布

Fig. 3 Solidification temperature-time cloud diagram and effective stress distribution at longitudinal section of casting



（a）模具预热温度对有效应力的影响　　（b）模具预热温度与有效应力的关系

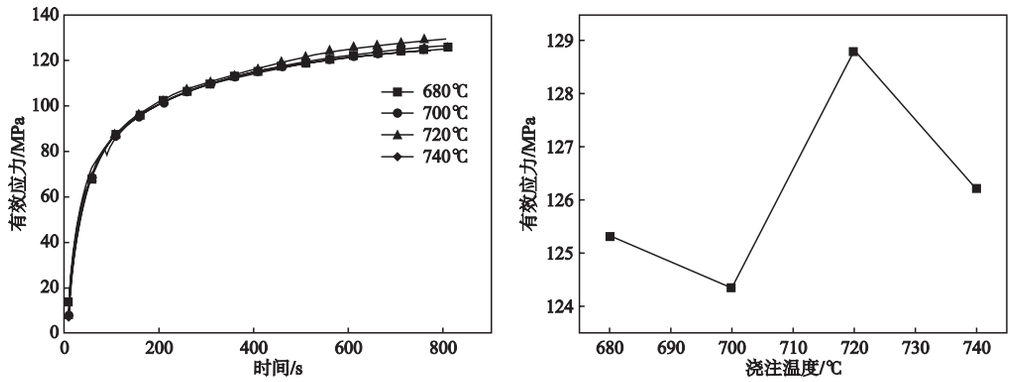
图4 不同模具预热温度—有效应力变化曲线

Fig. 4 Effective stress change curves at different mold preheating temperatures

2.4 模具壁厚对有效应力的影响

选取模具预热温度为350 ℃，浇注温度为700 ℃，换热系数为1 000 W/（m^2·K），模具壁厚分别选择30 mm、80 mm、150 mm，模具壁厚指模具表面到铸件的距离。选择工艺参数试验安排表3中第3、8、9组进行分析。

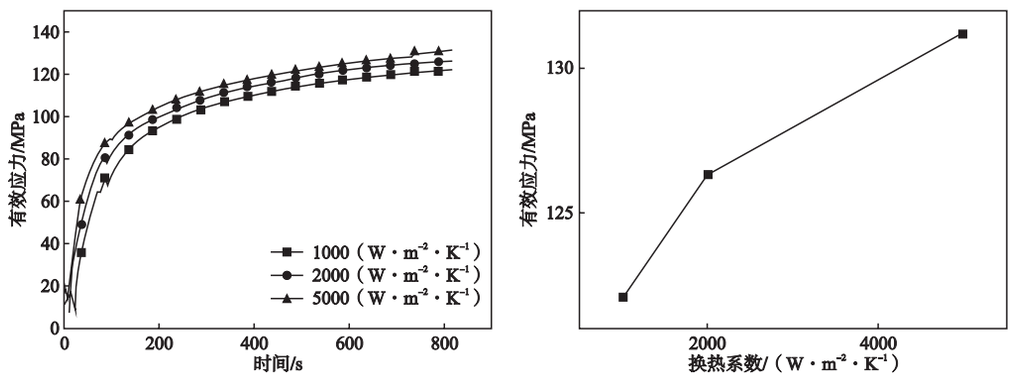
从图7结果可以分析，有效应力随模具壁厚增大而减小，当模具壁厚为30 mm时，分析点有效应力最大为120.80 MPa，当模具壁厚为150 mm时，有效应力最大为100.55 MPa。因此，模具壁厚对铸件有效应力值有较大影响，模具壁厚越大，铸件在冷却过程中散热越平稳，有效应力越小。适当增大模具壁厚对减小铸件有效应力有积极作用。



（a）浇注温度对有效应力的影响　（b）浇注温度与有效应力的关系

图5　不同浇注温度与有效应力变化曲线

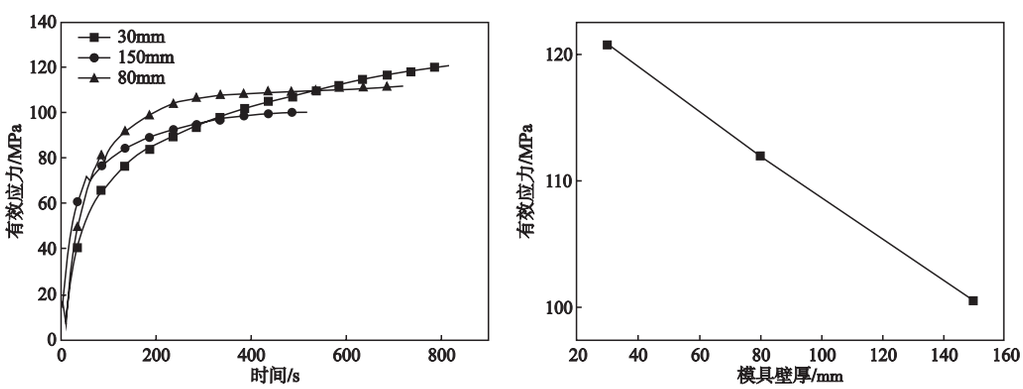
Fig. 5 Effective stress change curves at different pouring temperatures



（a）换热系数对有效应力的影响　（b）换热系数与有效应力的关系

图6　不同换热系数与有效应力变化曲线

Fig. 6 Effective stress change curves under different heat transfer coefficients



（a）模具壁厚对有效应力的影响　（b）模具壁厚与有效应力的关系

图7　不同模具壁厚与有效应力变化曲线

Fig. 7 Effective stress change curves for different wall thicknesses of mold

3 试验验证与铸件性能

根据对真空调压铸造金属型铸件凝固过程有效应力分析的结果，选择所设定工艺安排结果中最佳工艺参数：浇注温度700 ℃、模具预热温度350 ℃、模具壁厚150 mm，换热系数为1 000 W/（m^2·K），进行试验。为确保合金成分的一致性，试验合金材料选用检验合格的同一批ZL205A铸锭及相同的试验设备进行三次浇注试验。试验采用45 kW电阻炉加热铝料，利用自主研发的真空调压设备进行除气后充型，得到了表面光洁的试样铸件。经X射线探伤无缺陷后，对铸件进行T6热处理，完成拉伸试棒加工如图8所示，利用蔡司光学显微镜观察试样金相组织（图9）。经拉伸、硬度测得试棒平均抗拉强度为525 MPa，屈服强度为462 MPa，布氏硬度平均值达到151 N/mm^2，铸件组织致密、均匀，性能良好，铸造应力得到了有效控制。

图8 铸件及拉伸试棒
Fig. 8 Casting and tensile test bars

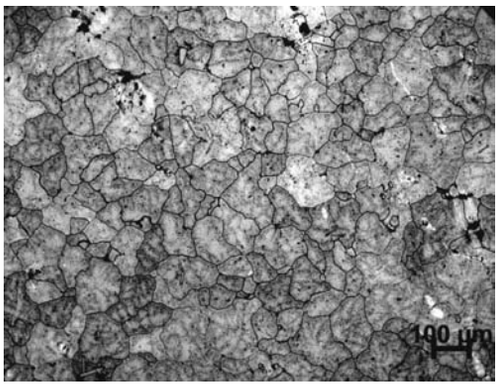


图9 铸件的金相组织
Fig. 9 Metallographic structure of casting

4 结论

（1）在一定范围内，模具温度升高对降低铸件有效应力有积极作用，且影响程度较大，但随着模具温度升高，对有效应力的减弱程度递减，合理提升模具温度有助于控制铸件有效应力，提升铸件质量。

（2）浇注温度和换热系数对铸件有效应力有一定影响，但影响程度较弱，适当提升浇注温度，降低模具换热系数对铸件有效应力控制有积极影响。

（3）模具壁厚对铸件有效应力影响较明显，模具壁厚越大，铸件有效应力模拟值越小，在满足经济性等条件下，增大模具壁厚有利于减小铸件有效应力，避免热裂发生。

参考文献：

[1] 王新，徐成海，张杨. 真空铸造技术的研究现状 [J]. 真空，2005，42（1）：6–10.
[2] 吴江，冯志军，闫卫平，等. 调压铸造技术的研究现状及发展 [J]. 铸造，2009，58（8）：804–809.
[3] 樊云杰，杨智勇，张雄飞，等. 铝合金牵引梁的数值模拟和缺陷预测 [J]. 铸造技术，2018（10）：2253–2256.
[4] 闫盛青，林有希，郑开魁，等. 金属型铸造模具涂料研究进展 [J]. 热加工工艺，2019，48（3）：11–14.
[5] 朱磊，林红旗，李冀刚，等. 薄壁铝合金箱罩金属型铸造模具设计 [J]. 铸造技术，2018，39（3）：597–600.
[6] 詹远光，张宁，詹远贵. Al-Si系铸造铝合金的成型方法概述 [J]. 广东化工，2013（11）：111–112.
[7] 樊振中，阮磊，杨天杰，等. ZL205A上臂铸件低压充型工艺设计 [J]. 铸造，2017，66（8）：882–887.
[8] 李玉，张国伟，徐宏，等. ZL205A合金热处理工艺研究 [J]. 铸造技术，2017，38（1）：68–69，73.
[9] FAN Li，HAO Qitang，XIAN Fuchao. Element segregation behavior of aluminum-copper alloy ZL205A [J]. China Foundry，2014，11（6）：510–515.
[10] 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.
[11] 潘婷婷，何涛，霍元明，等. ZL116 铝合金真空吸铸的有效应力分布预测与控制 [J]. 轻工机械，2019，37（2）：33–37，44.
[12] 胡悦高，邵光杰，杨弋涛. 浇注与铸型温度对6082铝合金热裂倾向的影响 [J]. 铸造，2008，57（1）：45–48.

[13] RATHI S K，SHARMA A ，SABATINO M D，et al. Effect of mould temperature，grain refinement and modification on hot tearing test in Al-7Si-3Cu alloy [J]. Engineering Failure Analysis，2017，79：592–605.
[14] AKHYAR H，MALAU V，SUYITNO，et al. Hot tearing susceptibility of aluminum alloys using CRCM-horizontal mold [J]. Results in Physics，2017，7：1030–1039.
[15] 蔡庆，张晓波，张亦杰，等. 基于ProCAST数值模拟ZL205A热裂行为的研究 [J]. 铸造技术，2015，36（6）：1503–1506.
[16] 邱桂永，韩建民，杨智勇，等. 凝固模拟参数设置合理性的检验方法研究及应用 [J]. 铸造，2007（9）：952–955.
[17] 王朋. ZL205A大型薄壁筒形件变形预测及控制 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2017.
[18] 李铭文. ZL205A低压铸造凝固过程应力应变模拟及控制 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2018.
[19] 姜不居. 铸造手册：特种铸造 [M]. 第3版，北京：机械工业出版社，2014.

Study on Effective Stress Control and Properties of Vacuum Pressure Regulating Casting ZL205A

DENG Pan–ke, YANG Zhi–yong, HAN Jian–min, LI Wei–jing, SUN You
（School of Mechanical Electric and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China）

Abstract:
In order to control the average stress of the casting during vacuum pressure regulating casting solidification to avoid hot tearing, the temperature field and stress field of ZL205A aluminum alloy were simulated by using the finite element analysis software ProCAST. The study was carried out on the factors affecting the casting stress, such as casting temperature, pre-heat temperature of metal mold, heat transfer coefficient as well as the thickness of metal mold. A reasonable casting process was obtained. The results show that: the influence degree of mold preheating temperature, heat transfer coefficient of metal mold, mold thickness and metal liquid pouring temperature on the casting decreases successively from high to low, and the best technological parameters under experimental conditions were obtained as follows: pouring temperature is 700 ℃, mold preheating temperature is 350 ℃, mold wall thickness is 150 mm, and heat transfer coefficient is 1000 W/(m^2・K). The experiment verifies that the castings obtained by this process have uniform structure, smooth surface, and the tensile strength is up to 525 MPa and yield strength is up to 462 MPa.

Key words:
vacuum pressure regulating molding; aluminum alloy; metal mold; numerical simulation; stress control; mechanical property

（编辑：张允华，zyh@foundryworld.com）