

# ZL205A 合金大型筒体类铸件偏析缺陷控制技术研究

王建军<sup>1,3</sup>, 丁方政<sup>2</sup>, 郑卫东<sup>1,3</sup>, 杜旭初<sup>1,3</sup>, 黄粒<sup>1,3</sup>

(1. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095; 2. 空装驻北京地区第六军事代表室, 北京 100016;

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:** 以ZL205A合金大型筒体类铸件偏析缺陷为研究对象, 研究了偏析缺陷产生的部位和原因, 采用铸造数值模拟技术及铸件实物浇注试验对比研究了浇注工艺对铸件偏析缺陷的影响, 结果表明, 采用低压浇注工艺可明显降低铸件偏析缺陷。此外, 通过采用退让性较佳的树脂砂芯, 释放了凝固末期凝固残余热应力, 避免了热节区域出现高热内应力, 减少了铸件的偏析缺陷。

**关键词:** ZL205A合金铸件; 偏析缺陷; 浇注工艺; 控制

减重、高可靠性、低成本、短制造周期是现代航空航天工业发展的目标。铸造铝合金以其质量轻、强度高的优势及现代铝合金铸造技术水平的进步, 使得铝合金铸件在航空航天的应用越来越广泛。尤其是在20世纪七八十年代, 北京航空材料研究院研制成功了ZL205A高强度铝合金, 其力学性能指标达到甚至超过了常规高强度铝合金锻件LD10的力学性能, 使得ZL205A合金铸件开始应用于航空航天承力结构件, ZL205A合金的研制成功并推广使铝合金铸件应用具备了以铸代锻的可能。以铸代锻的工艺不仅解决了国内锻造设备生产不出航空航天型号所需要的大型锻件问题, 而且节省了大量的机加工费用, 并加快了生产周期。

虽然ZL205A高强度铝合金铸件已经得到了一定程度的推广应用, 但在铸件的应用中, 还存在着多方面的问题需解决, 比如铸件内部质量不稳定、力学性能的离散性较大及线性共晶偏析等缺陷的控制等问题。表1为北京航空材料院近年来某大型筒体铸件出现缺陷问题的统计(统计了1个批次20件铸件出现的缺陷)。

可以看出, ZL205A合金大型筒体铸件的铸造工艺尚未成熟, 缺陷率很高, 尤其是偏析缺陷已经成为ZL205A合金铸件在航空航天规模化应用的最大障碍。因此, 本研究从偏析缺陷产生的原因出发, 通过对航天用典型ZL205A合金筒体类铸件铸造工艺分析研究, 以期找到解决大型ZL205A合金筒体铸件偏析的方法, 使得ZL205A合金铸件可以在航空航天等武器型号中可靠、成熟的应用。

## 1 缺陷定位

偏析铸造缺陷对ZL205A大型铸件的影响是巨大的, 一旦出现偏析缺陷将导致铸件无法使用甚至报废。因此有必要研究偏析缺陷产生的原因及解决措施。

通过分析筒体铸件的X射线底片, 发现偏析缺陷多集中分布在铸件缝隙浇道的底部区域, 即缝隙内浇道与铸件交接区域(图2)。偏析缺陷在X射线底片呈现为线性树枝状形貌, 如图3所示。

从铸件上截取存在偏析缺陷的试样, 进行SEM表征, 结果见图3。

从图4的金相可以看出, 大量的白色网状物分布在枝晶间和晶界上。分别对试样

作者简介:

王建军(1968-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事铸件检验研究。E-mail: torden@139.com。

中图分类号: TG245

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)

04-0396-06

收稿日期:

2019-11-26 收到初稿,

2020-01-15 收到修订稿。

白色区域和灰色区域进行EDS分析, 结果见图5及表1。

结果表明: 灰色区域主要为Al、Mn与Cu元素, 其中Al、Mn与Cu元素所占质量分数分别为93.55%、0.36%与6.09%; 灰色区域主要为 $\alpha$ 、 $\theta$ 和T相; 白色区域主要为Al与Cu元素, 两者所占质量分数分别为48.94%和51.06%, 且Cu原子数与Al原子数比值接近1:2。分析可知亮白相为富集Cu元素的 $Al_2Cu$ 相, 由于Cu比重大于Al, 因此偏析缺陷在X射线底片上呈亮白色。

综上所述, 偏析缺陷主要集中分布在缝隙浇道根部靠近浇注系统下端的部位, 偏析缺陷组织为 $Al_2Cu$ 相, 其沿晶界分布, 由于Cu比重大于Al, 因此在X射线底片呈现为亮白色树枝状。

## 2 产生原因

航空航天用大型铝合金铸件的研制及生产一般都采用缝隙式浇注系统, 重力浇注或树脂砂型低压浇注的方法成形。从缺陷统计结果来看, 两种浇注工艺都存在偏析缺陷。为了找到偏析缺陷产生的原因, 采用Procast铸造模拟软件对两种浇注工艺进行模拟计算。

图6与图7分别为铸件的凝固固相率模拟计算结果与缝隙浇道固相率模拟计算结果。

从图6的铸件的凝固固相率来看, 两种浇注方式固相率分布总体符合顺序凝固的特点。由于铸件偏析缺陷大多分布于缝隙浇道与铸件本体交接处, 进一步对缝隙浇道与铸件交界处进行模拟, 结果如图7所示, 缝隙浇道与铸件相接处的凝固温度高于与其毗邻区的温度, 固相率也低于毗邻区。因此缝隙浇道与铸件本体交接处成为低压和重力浇注时的铸件的热节。

铸件热节部位是极易出现铸造缺陷的部位, 因为热节部位是铸件最后凝固的部位, 也是凝固最后阶段最危险区域。因为此时铸件热节部位受到如图8所示的外力作用: ①铸件和浇注系统冷却速率差异造成的内应力; ②凝固收缩时本体对热节部位的拉应力; ③砂芯阻止铸件凝固收缩对热节产生的压应力。当3个力产

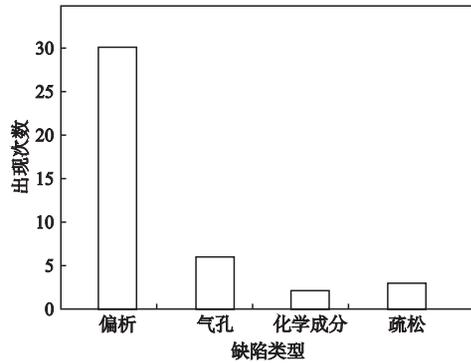


图1 ZL205A高强度铸件应用质量问题统计  
Fig. 1 Quality problem statistics of ZL205A castings



图2 偏析缺陷集中分布位置  
Fig. 2 Position of segregation defects

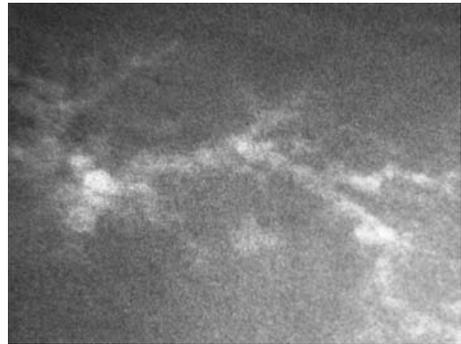


图3 偏析缺陷射线底片图  
Fig. 3 X-ray film of segregation defects

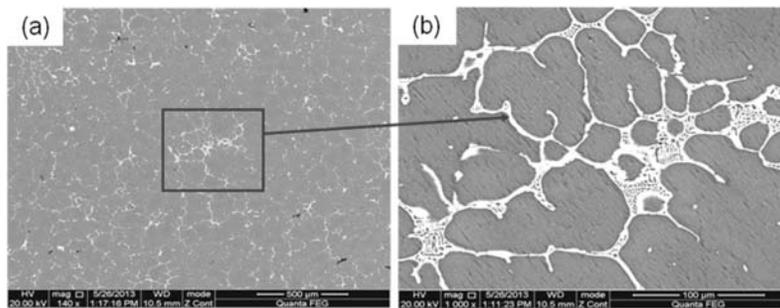


图4 线性偏析冶金缺陷图  
Fig. 4 SEM images of segregation defects

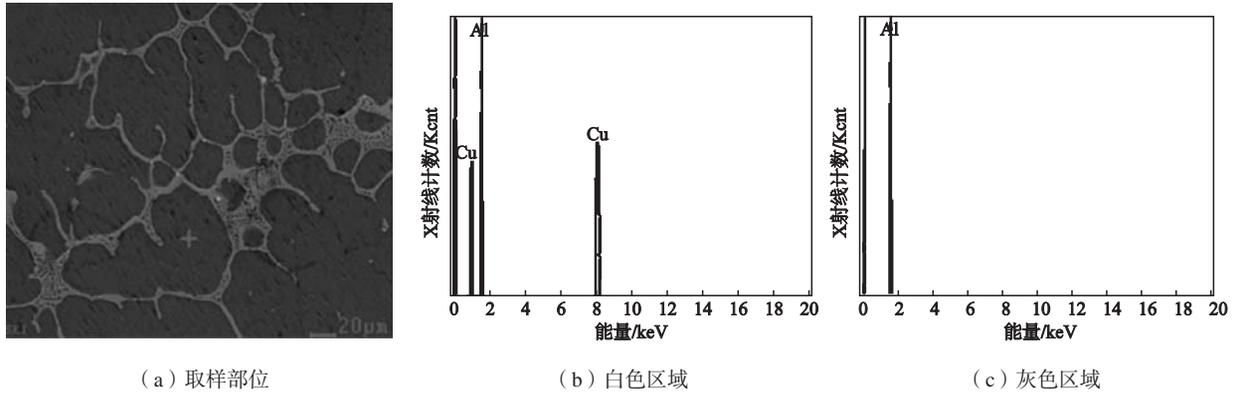


图5 线性偏析冶金缺陷EDS对比分析测试结果  
Fig. 5 EDS of matrix and precipitated phase

表1 EDS测试结果  
Table 1 EDS results of matrix and precipitated phase in Fig.5

元素	百分比	Al	Mn	Fe	Cu	总量
谱图1	质量分数	46.94	-	-	52.06	100
	原子分数	70.30	-	-	29.70	
谱图2	质量分数	93.55	0.36	-	6.09	100
	原子分数	97.13	0.18	-	2.68	

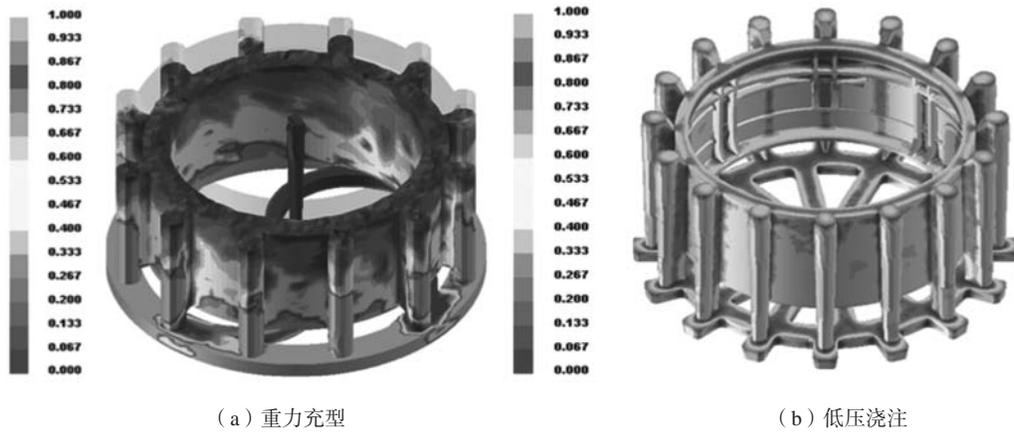


图6 铸件凝固固相率

Fig. 6 Solidification phase ratios in solidification process of castings produced by gravity casting and low pressure casting

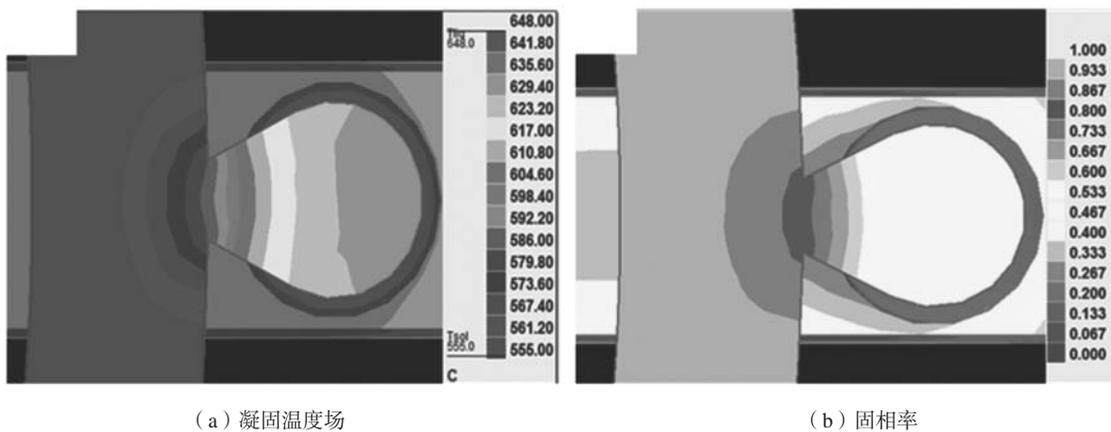


图7 缝隙浇道凝固温度场与固相率FEM仿真计算结果

Fig. 7 Solidification temperature field of slot gate and FEM solidification phase computing results

生的作用力达到或超过热节部位晶粒间的结合力时，晶粒裂开分离，此时尚未凝固的Al<sub>2</sub>Cu相迅速补缩裂缝（ZL205A合金固液两相区温度梯度较大），最终形成偏析，见图9。由于低熔点的液体富铜，其密度大于ZL205A的密度，所以在X底片上显亮色，裂缝处充填熔点合金液后形成的偏析缺陷形貌就像树枝状。

综上可知：偏析缺陷产生于凝固过程，为凝固过程缝隙浇道与铸件交接部位的热节和内外应力综合作用的结果。

### 3 解决措施

偏析铸造缺陷产生于铸件凝固过程，因此控制或消除铸件偏析缺陷应从控制凝固过程入手，即从铸造工艺方面对偏析缺陷进行控制。①凝固工艺：降低缝隙浇道与铸件本体交接处的温度梯度；②改善树脂砂型芯的退让性，减小铸件凝固末期的收缩阻力。

#### 3.1 铸造工艺

##### 3.1.1 铸件凝固过程控制

分别对铸件采用的浇注方法即重力充型与低压充型时缝隙浇道高度和水平方向上的凝固温差进行模拟对比，从表2和图10、11可以看出：重力方式浇注时缝隙浇道高度方向上的温差为186℃，低压浇注时缝隙浇道高度方向上的温差为64℃，与重力浇注相比温差降低了122℃；重力充型时缝隙浇道径向温度差为312℃，低压浇注时缝隙浇道径向温度差为108℃，与重力浇注相比，温差降低了204℃；与铸件重力浇注凝固时缝隙位置的温差峰值324℃相比，低压浇注时缝隙位置的凝固温差峰值仅为126℃，降低了62%，因此选用低压浇注成形工艺方案，可有效调控凝固温度场，实现顺序凝固。

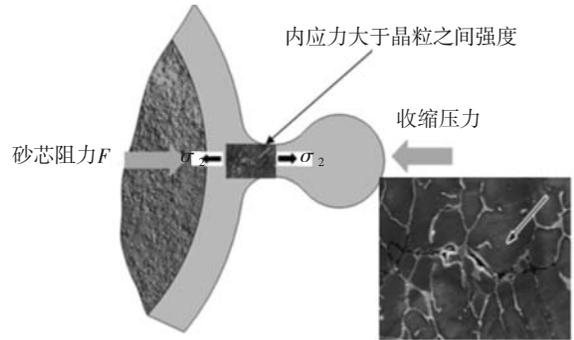


图8 热节部位受力示意图

Fig. 8 Force diagram of thermal center

##### 3.1.2 验证试验

验证试验在相同的造型工艺和相同合金熔炼工艺下进行，重力浇注与低压浇注时铸件内部偏析缺陷数量检测结果如图12所示。由图12可知：重力浇注工艺下浇注的3批次铸件（6件）内部偏析总数为25个；低压浇注工艺下浇注的3批次铸件（6件）内部偏析总数为6个。

重力浇注时，缝隙浇道处金属液自下而上顺序凝固，但浇道位置凝固温度差较高，总体未形成合理的温度梯度，凝固末期糊状区位于铸件与缝隙内浇道之间偏向于铸件一侧，最后凝固时缝隙立筒中的熔体填充至铸件内部（此时金属液的成分已于原始合金液成分有所不同），凝固冷却结束后在铸件内部形成了偏析冶金缺陷；低压浇注时，缝隙浇道同样也是自下而上的顺序凝固温度梯度，且铸件整体自内向外顺序凝固，最后凝固部位转移至缝隙浇道偏向浇道的部位，最终形成了合理的固温度梯度，偏析的部位转移至缝隙浇道部位，避免了铸件内部产生偏析缺陷。其次，重力浇注时铸件内部凝固温差峰值过大，铸件最后凝

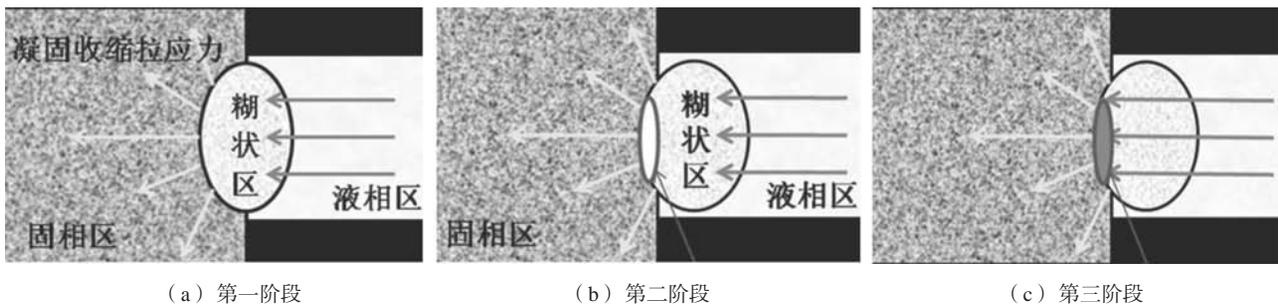


图9 偏析缺陷形成示意图

Fig. 9 Schematic diagram of segregation defect formation

表2 不同凝固成形工艺下凝固峰值温差测试结果

Table 2 Difference values of solidification temperature under gravity casting and low pressure casting

试验	凝固方式	凝固温差峰值/℃	径向截面温差峰值/℃	高度方向截面温差峰值/℃
1	重力浇注	324	312	186
2	低压浇注	126	108	64

固部位，也就是铸件本体与缝隙浇道相接处在凝固末期将产生严重的反抽，形成严重的偏析冶金缺陷；而低压浇注下铸件内部凝固温差峰值较小，可形成较为合理的凝固顺序，因此偏析冶金缺陷数量得到了有效控制。

### 3.2 调整树脂砂型芯退让性

从重力浇注和低压浇注工艺的3批次铸件内部偏析数统计结果（重力浇注偏析总数为25个；低压浇注工艺偏析总数为6个）来看，浇注工艺并不是影响大型

筒体铸件形成偏析缺陷的唯一因素。结合上文分析结果，其还与铸件的凝固过程产生的内应力有关。

调整砂芯方案：将砂芯做成空心，砂芯的厚度为80 mm，在此基础上将砂芯平均分成4块，每块之间的间隙为6~8 mm，如图11所示。

型芯退让性对铸件偏析缺陷的影响验证。将重力浇注和低压浇注过程的型芯进行调整，其余的参数不变进行验证试验。浇注结果：重力浇注工艺下浇注的3批次铸件内部偏析总数为9个；低压浇注工艺下浇注的3批次铸件内部偏析总数为2个。

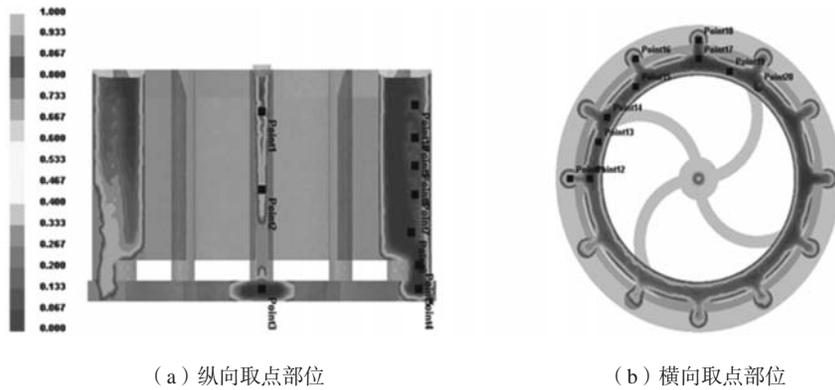


图10 重力浇注凝固峰值温差对比分析

Fig. 10 Comparison of temperature curves of different orientations under gravity casting

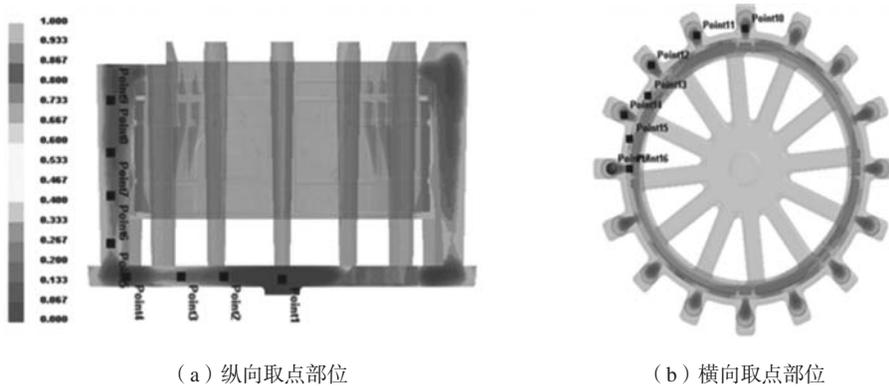


图11 低压浇注凝固峰值温差对比分析

Fig. 11 Comparison of temperature curves of different orientations under low pressure casting

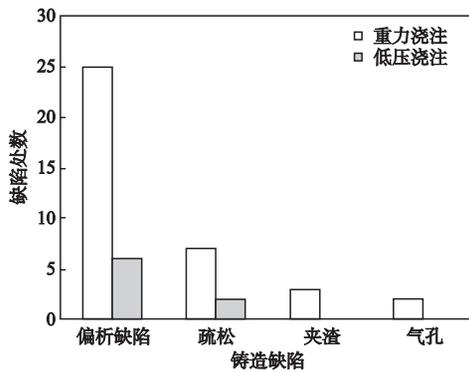


图12 不同凝固成形工艺下的铸造缺陷数量统计结果

Fig. 12 Statistical results of metallurgical defect numbers under different casting processes

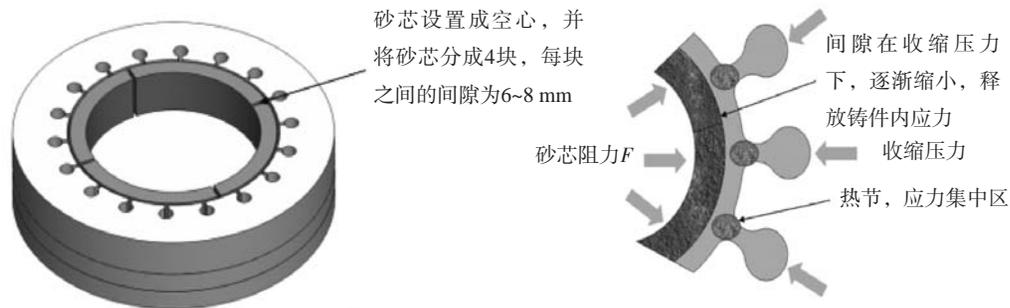


图13 树脂砂砂芯退让性工艺优化方案

Fig. 13 Improved resin-bonded sand cores with better deformability

## 4 结论

(1) 采用模拟仿真计算对比研究了重力浇注与低压浇注时ZL205A筒体铸件及缝隙浇道处的凝固相场与凝固温度梯度分布, 结合铸件实物浇注试验, 研究表明: 采用低压浇注工艺可明显降低大型筒体铸件偏析缺陷, 铸件偏析缺陷数量大为减少。

(2) 通过设计退让性较佳的树脂砂芯, 凝固残余热应力在凝固末期可通过树脂砂型芯得以释放, 避免了热节区域高内应力的出现, 减少了ZL205A筒体铸件的偏析缺陷。

### 参考文献:

- [1] 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): 1-5.
- [2] 贾泮江, 陈邦峰. 高强高韧铸造铝合金的研究现状及发展 [C]//中国航空学会2007年学术年会, 2007.
- [3] 贾泮江, 陈邦峰. 显微共晶偏析对ZL205A合金力学性能的影响 [J]. 材料工程, 2008 (2): 1-4.
- [4] 胡汉起. 金属凝固原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 46-78.
- [5] 王继昌. ZL205A合金大型整体舱段低压铸造及典型缺陷研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [6] 吴士平, 王晔, 梁华森, 等. 铝合金ZL205A筒形铸件的偏析形成及凝固参数特征 [J]. 特种铸造及有色合金, 2012年年会专刊: 344-346.
- [7] 李玉胜, 翟虎. 高强度ZL205A合金大型铸件“白点”偏析研究 [J]. 铸造, 2007, 56 (2): 185-187, 191.
- [8] 孙国雄, 郭景杰. 世界铸造技术最新发展 [J]. 铸造, 2008, 57 (5): 423-427.
- [9] 冯志军, 孙学敏, 马春江. 大型薄壁铝合金箱体的铸造工艺 [J]. 铸造, 1995 (9): 23-25.
- [10] 康进武, 朱慧, 黄天佑. 基于有限差分网格的铸件热应力分析 [J]. 铸造, 2006, 55 (3): 259-261.
- [11] 王君卿, 孙逊, 关洋, 等. 大型铸件成形过程数值模拟及工艺优化 [J]. 铸造, 2006, 55 (9): 916-921.

## Control Technology of Segregation Defects in ZL205A Alloy Large Cylinder Castings

WANG Jian-jun<sup>1,3</sup>, DING Fang-zheng<sup>2</sup>, ZHENG Wei-dong<sup>1,3</sup>, DU Xu-chu<sup>1,3</sup>, HUANG Li<sup>1,3</sup>

(1. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. The 6th Military Representative Office of Air Force Equipment Department in Beijing, Beijing 100016, China; 3. Beijing Engineering Research Center for Advanced Aluminum Alloys, Beijing 100095, China)

### Abstract:

The location and formation reason of segregation defect in the ZL205A Alloy large cylinder castings were studied. The effect of casting process on the segregation defect of casting was studied by using numerical simulation technology and casting pouring test. The results show that the segregation defect of casting can be reduced significantly by using low pressure casting process. Furthermore, resin bonded sand core with the better deformability was used to release the residual thermal stress at the end of solidification and avoid high thermal internal stress in the hot spots, which effectively reduce the segregation defects of castings.

### Key words:

ZL205A sand castings; segregation defects; casting process; control