

熔模精铸薄壁铸件真空吸铸工艺研究

李新雷, 李世新, 尹承泽

(西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 陕西西安 710072)

摘要: 对所研究的熔模型薄壁特征件真空吸铸工艺过程中的浇注系统及排气系统进行了设计, 并利用数值模拟软件对薄壁件的充型过程和可能产生的铸造缺陷进行了仿真模拟。结果表明: 真空吸铸成形方法能够较好地解决浇注该铸件时易遇到的充型困难、喷溅及憋气等技术难题, 可获得轮廓完整、内外品质优良的合格精铸件; 立式单通道浇注方案优于卧式双通道浇注方案, 使合金液流充型过程平缓顺畅, 能够避免金属液出现汇流和冲击现象, 减少铸造缺陷的产生。

关键词: 真空吸铸; 薄壁精铸件; 浇注系统; 数值模拟; 铸造缺陷

目前, 薄壁铸件的规模化生产是铸造技术发展的主流方向, 也是工业产品轻量化发展的前提, 尤其在汽车电子、国防军工及轨道交通等领域实现合金铸件薄壁化有着极大的社会经济价值。性能高、缺陷少、近净成形成为了中小型复杂薄壁构件液态精确控制成形的发展趋势^[1]。而真空吸铸技术作为反重力铸造的一种, 具有充型能力强、成形性能好以及充型速度可控等特点。因此, 在精密铸造生产领域具有其他铸造技术不可替代的竞争力优势, 非常适合中小型复杂薄壁构件的生产^[2]。真空吸铸在提高合金液充型能力的同时, 还增强了其补缩能力。

本文以某薄壁特征件作为研制对象, 选取熔模类型壳, 采用ZL101A铝硅合金进行真空吸铸成形, 对工艺中浇注系统设计、排气系统设计以及铸造缺陷预防等关键技术环节开展相关研究, 为获得理想熔模型薄壁精铸件真空吸铸成形工艺提供理论基础和技术指导。

1 工艺方案制定

薄壁铸件铸造过程中, 解决合金熔体的充型问题是获得高质量铸件的关键所在。表面张力和拉普拉斯力是影响合金液充填薄壁铸件型腔的重要因素, 一般采用传统重力铸造难以精确成形^[3]。想要获得轮廓完整、尺寸精确及质量合格的铸件, 其中合金化学成分、熔炼工艺、型壳性质及铸造工艺等均起着十分重要的作用, 特别是铸造工艺和型壳性质是影响铸件获得最终组织及性能的重要因素。根据该铸件结构特征和技术要求, 选用硅溶胶铸型材料和真空吸铸反重力铸造工艺, 浇注过程在自制的一体化真空吸铸机上完成。

1.1 铸件结构特征分析

应用Pro/E造型软件对铸件完成三维实体建模, 如图1所示。结构特征: 铸件内部成空腔状态, 最大外径为46 mm, 内径为42 mm, 轮廓高60 mm, 壁面上存在多个封闭或半封闭的开孔。从剖面图1b可看出, 铸件壁薄且厚度不均, 最小壁厚为1.8 mm, 最大壁厚为8.6 mm, 且存在厚度为4~8.6 mm的渐变区。由此可见, 该零件完全属于典型的小型化、轻量化、薄壁化、复杂化、高精度化的近净成形构件。

通过结构分析可知, 铸造此零件最大的难点是壁厚不均匀、截面变化幅度大、

作者简介:

李新雷(1975-), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事金属凝固技术研究。电话: 13709283406, E-mail: lxl@nwpu.edu.cn

中图分类号: TG249.9

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2020)12-1312-07

基金项目:

国家自然科学基金项目(51375391); 陕西省重点研发计划(2020GY-117)。

收稿日期:

2020-04-21 收到初稿,

2020-05-18 收到修订稿。

合金液汇流点多,在充型上存在一定困难,如果采用重力铸造根本无法保证完整成形及铸件品质,所以采用真空吸铸反重力铸造才能满足该产品在尺寸精度和表面质量上的工艺要求。

1.2 浇注系统设计

根据反重力铸造工艺的特点,浇注系统同时兼顾着充型和凝固补缩这两种功能,即是合金液平稳充填铸型的流动通道,又是凝固补缩的压力通道^[4]。理想的浇注系统不仅可以实现合金液由下而上顺序平稳地充填铸型,还可以保证凝固过程按顺序凝固进行。

因此,从实现顺序充型和凝固补缩的角度考虑,浇注系统设计整体上采用直浇道和内浇道相接的树模结构。根据铸件结构特点,本次试验拟设计图2所示的两种浇注系统。方案一:卧式双通道浇注系统,方形直浇道截面尺寸为45 mm×45 mm,长为340 mm,矩形内浇道横截面为25 mm×8 mm,长为16 mm,内浇道连接着铸件较大壁厚的环形部位。直浇道上分布三层,间隔为80 mm,每层安放4个铸件。这样设计的优势是增大合金液的充填和补缩流量,有利于提高铸件致密度。方案二:立式单通道浇注系统,直浇道尺寸与方案一相同,并采用同样的组模方式,不同的是将矩形内浇道安置在铸件壁厚较大的环形部位外侧。该方案改变了液流的充型方向,采用底注式浇注,使充型更为平稳。

1.3 排气系统设计

本次使用的熔模型壳为硅溶胶做粘结剂的封闭式型壳,相比砂型和石膏型壳,透气性较差^[5]。因此,不利于快速充型时型腔内原有气体以及型壳和型芯受热后所释放出的气体顺利排出,从而影响充型过程和工艺稳定性。鉴于此情况,在直浇道顶端开设截面尺寸为50 mm×50 mm的排气孔以增加型壳的透气性,排气系统如图3所示。这样设计的排气系统,不仅能够起到很好的排气、集渣作用,同时也增大了局部散热面积,加快直浇道凝固速率,促进顺序凝固的进行。

2 数值模拟研究

通过ProCAST模拟软件仿真薄壁铸件的充型过程,可提前预测工艺方案设计的合理性及铸件品质。在模拟软件中,铸件材质选用AlSi7Mg0.3合金,铸型材料选用材料库中自带的REFRACTORY_Fused_Silica模型,厚度定义为6 mm。根据反重力铸造相关文献,并结合铝合金实际生产经验,设定合金浇注温度为720 ℃,充型速度为120 mm/s,吸铸真空度为-50 kPa,模具温度为300 ℃,环境温度为20 ℃,结晶保压持续时间为

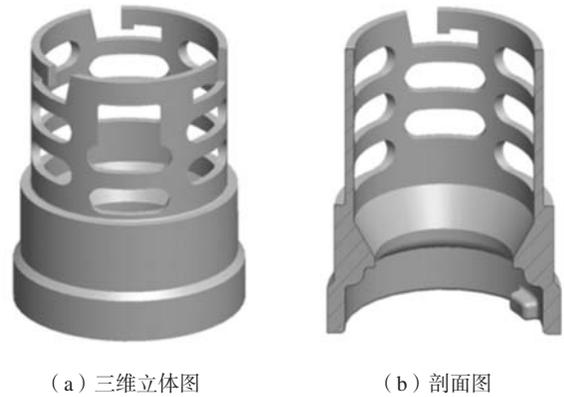


图1 铸件实体结构模型
Fig. 1 The solid structure of castings

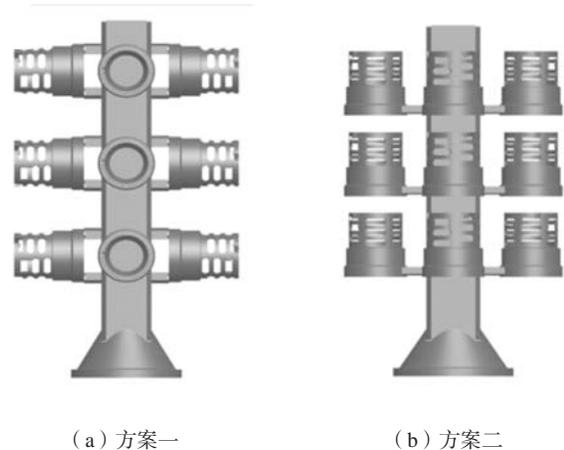


图2 薄壁铸件浇注方案

Fig. 2 The pouring schemes for thin-wall castings

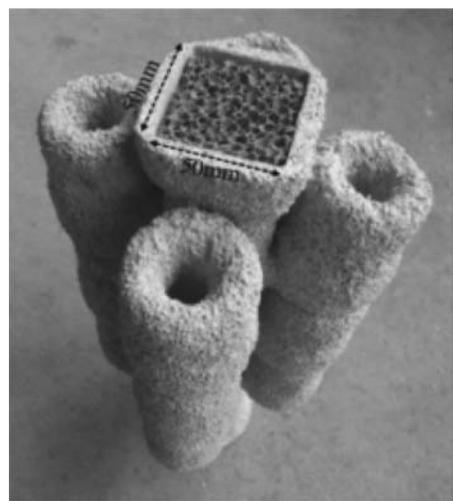


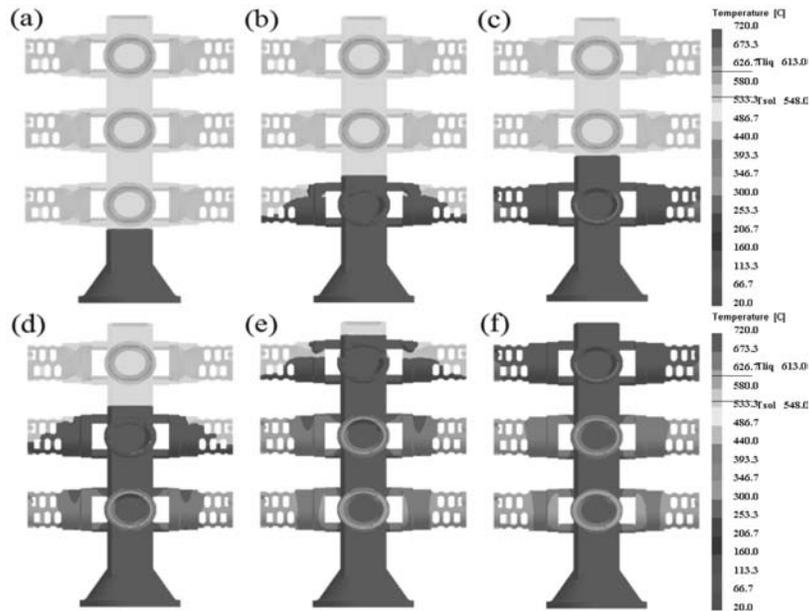
图3 硅溶胶熔模型壳排气系统
Fig. 3 The exhaust system of silica sol investment shell

100 s, 冷却方式选择自然空冷, 铸件与铸型界面间换热系数为 $500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})^{[4]}$ 。

2.1 充型流场模拟

图4和图5分别为两种方案下不同时刻铸件充型过程数值模拟结果。由图4和图5可知, 两种方案都能

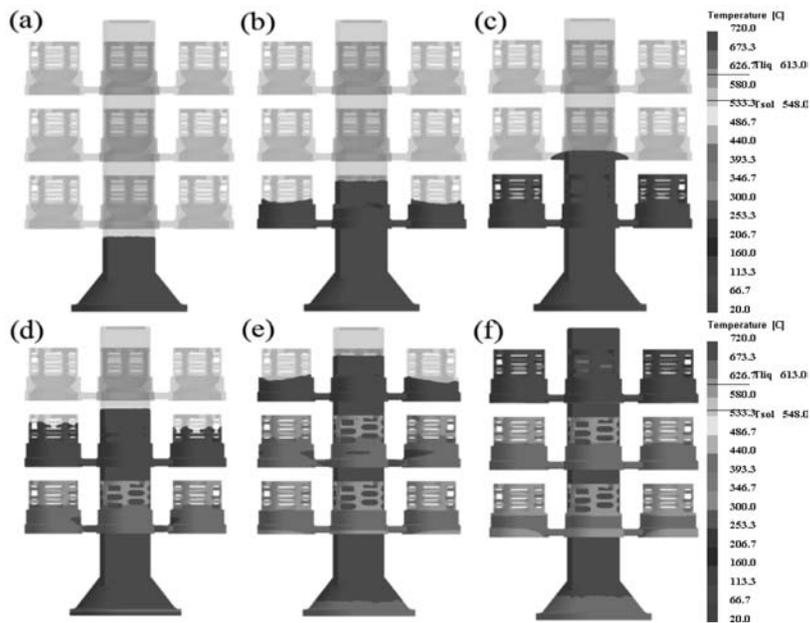
够实现金属液平稳迅速的逐层充填铸型, 且金属液在直浇道内上升过程稳定连续, 未出现喷溅或紊流现象, 说明吸铸压力选择适中。方案一, 上下两个内浇道同时流经金属液, 流量较大, 但是从充型完成时间来看, 卧式双通道浇注系统相比立式单通道浇注系统并没有提前结束充型, 则说明内浇道数量的多少并不



(a) 1.03 s; (b) 1.89 s; (c) 2.17 s; (d) 3.07 s; (e) 4.09 s; (f) 4.35 s

图4 方案一充型过程模拟结果

Fig. 4 Simulation results of filling process in scheme I



(a) 1.04 s; (b) 1.89 s; (c) 2.25 s; (d) 3.06 s; (e) 4.04 s; (f) 4.28 s

图5 方案二充型过程模拟结果

Fig. 5 Simulation results of filling process in scheme II

能加快充型完成时间。而且上下内浇道流入的两股金属液在较厚大的环形区域发生了交汇和冲击, 则有可能形成气孔或氧化夹杂等缺陷。另外, 此位置也是热节容易出现的区域, 凝固后可能产生疏松缺陷。方案二, 采用了底注式浇注, 熔体能够平稳地充填型腔, 没有出现液流交汇折叠或涡流等现象。因此, 相比较而言, 方案二所设计的浇注系统更为合理。

图6和图7分别为两种方案下铸件凝固过程的温度场分布模拟结果。从模拟结果可以看出, 两种浇注方式都能够实现从铸件末端→内浇道→直浇道的顺序凝固过程, 符合反重力铸造的顺序凝固特点, 凝固过程浇注系统对铸件的本体补缩充分。由图6可知, 卧式双通道浇注系统整体模组凝固呈现出从外到内的顺序凝固过程, 图7所示的立式单通道浇注系统, 整体模组凝固呈现出从上至下的顺序凝固过程。对比发现, 两种浇注方案的单个铸件也表现出良好的顺序凝固过程, 凝固最先开始于铸件顶端薄壁部位, 逐渐向中厚部位推进, 与内浇道连接的部位最后凝固。对比右侧温度梯度可知, 铸件在凝固过程中, 铸型内最高处液体的

温度和最低处的温度差超过了100℃左右, 这主要是由于铸件壁厚不均匀而引起的, 如果补缩不及时或不充分, 则会产生疏松类或浇不足等缺陷。

2.2 铸造缺陷分布模拟

将模拟软件缺陷预测模块中的孔隙率参数设定为2%, 对结晶凝固后的铸件进行铸造缺陷预测, 模拟结果如图8、图9所示。对比图8和图9可以看出, 两种浇注方式下凝固铸件基本不存在大面积的缩孔、缩松, 每个模组上的12个铸件缺陷分布情况大致相同, 由此表明, 铸件的组模位置对缺陷分布影响不大。由于直浇道系统是最后凝固区域, 因此会在心部形成一定程度的缺陷集中, 但之后会将这部分机加工切除, 所以不会影响铸件的整体性能。观察发现这两种浇注方式, 在远离内浇道的薄壁表面凝固区均出现了零星的缩松, 缩松缺陷之所以会出现在该位置处, 主要是因为充型过程中, 铸件顶部薄壁位置是熔体最后充填的位置, 当前沿液态金属到达这些位置时, 熔体温度可能已降至整个铸件平均温度以下。此外, 这些部位

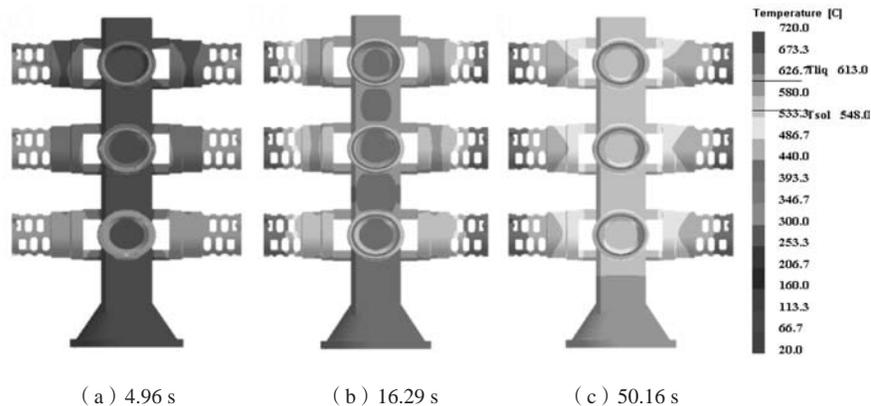


图6 方案一铸件凝固温度场分布模拟结果

Fig. 6 Simulation results of solidification temperature field in scheme I

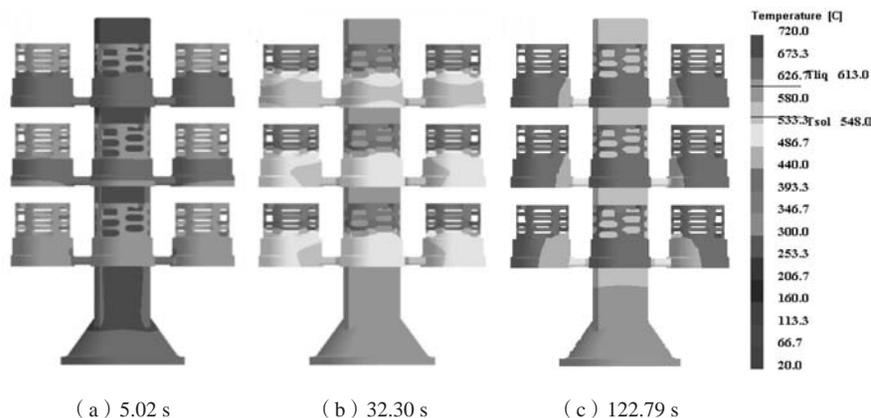


图7 方案二铸件凝固温度场分布模拟结果

Fig. 7 Simulation results of solidification temperature field in scheme II

壁厚过薄，型腔内的金属液凝固冷却速度较快，浇道不能起到有效的凝固补缩，甚至来不及补缩，从而形成缩松类缺陷。通常可考虑适当增大充型速度或合金浇注温度，提高金属液充型能力以减少此处缺陷的产生。图8显示在双通道浇注方式下，铸件较厚大的环形部位凝固后出现缩孔的可能性较大，这与图4充型过程模拟结果所显示上下两股金属液在此处发生交汇和冲击现象密切相关。图9a显示在立式单通道浇注方式下，铸造缺陷主要集中于铸件顶部薄壁位置和较厚大的环形部位，但体积相对较小，这从缺陷分布的XY方向纵剖面图9b中可清晰看出。

3 浇注结果及分析

3.1 薄壁铸件浇注结果

采用ZL101A铝硅合金材料在自制的真空吸铸机上进行浇注试验。图10为两种方案下浇注成形的薄壁铸件宏观形貌图和纵剖面图。从铸件外观形貌可以看出，该零件大体上充型完整，内外表面光滑，壁面没有出现明显的气孔、夹杂及疏松等缺陷，则表明工

艺参数选取合理，可以用于生产实践。对比观察剖面图10b和10d发现，采用卧式双通道浇注方案成形的铸件，虚线框显示的厚大环形区域出现了较大尺寸的海绵状缩孔，肉眼清晰可见。为了消除偶然性因素，又切开了同一个模组上的3个铸件，在其中2个铸件的相应部位同样发现了不同程度的此类缺陷，这与铸造缺陷模拟情况基本相符。缺陷的存在会大大影响铸件的结构强度和气密性等，降低铸件使用性能，因此，这种浇注方案不可取。而立式单通道浇注方案成形的铸件纵剖面上（图7b），同一位置并没有发现类似的孔洞，其他位置也没有发现缩孔以及其他种类缺陷，而且内表面也较为光滑，说明铸件品质优良。

浇注试验结果表明：采用卧式双通道浇注方式，金属液汇流造成的铸造缺陷要比几何热节引起缺陷的可能性大，不利于获得高品质的零件；采用立式单通道浇注方案成形的铸件质量优异，冶金缺陷少，符合该铸件的工艺要求。因此，在该薄壁铸件真空吸铸生产工艺中，立式单通道浇注方案要优于卧式双通道浇注方案，其浇注系统的可靠性更高。

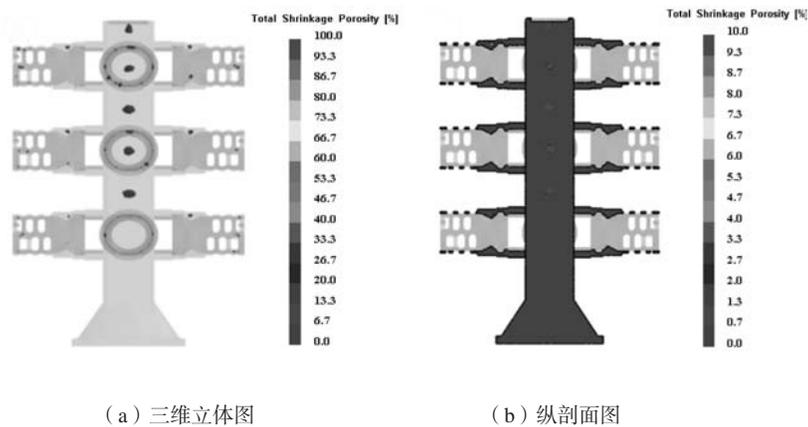


图8 方案一缺陷分布模拟

Fig. 8 Defects distribution simulation in scheme I

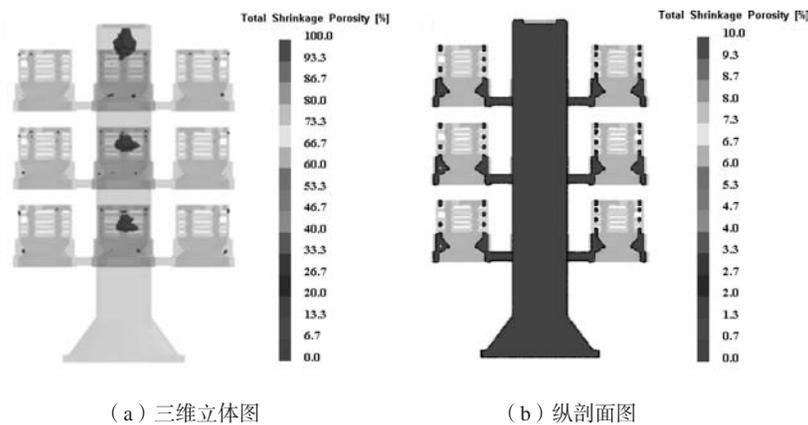
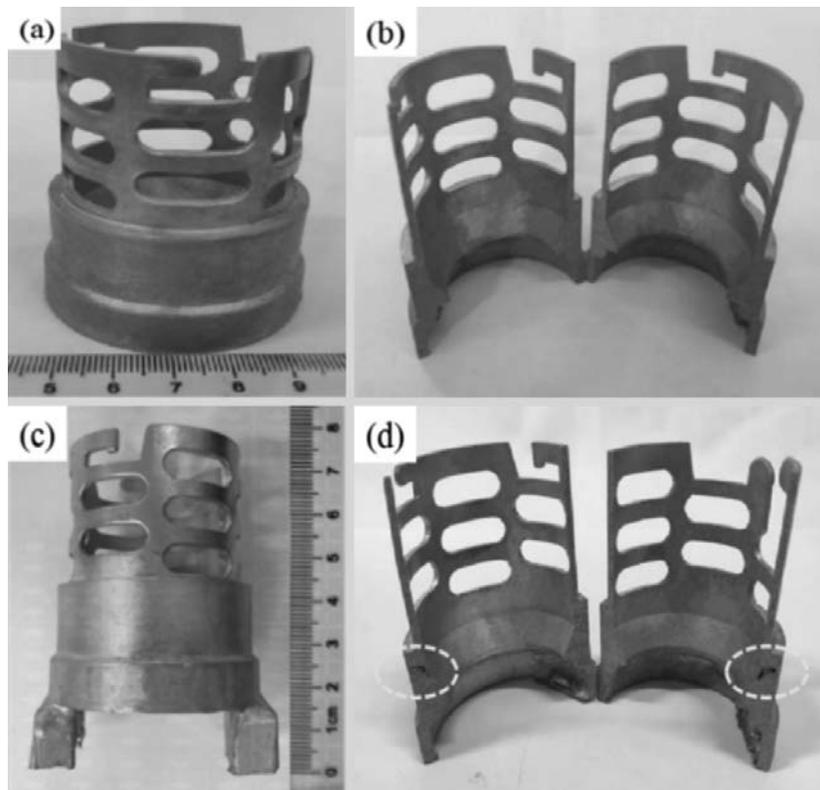


图9 方案二缺陷分布模拟

Fig. 9 Defects distribution simulation in scheme II



(a)和(b)为立式单通道浇注；(c)和(d)为卧式双通道浇注

图10 真空吸铸薄壁铸件

Fig. 10 The thin-wall castings produced by vacuum suction casting

3.2 无损探伤检测

采用X-射线探伤机对立式单通道浇注方式下成形的完整铸件进行全面X光无损探伤检测。从检查结果图11可以清楚看出，铸件内部没有出现孔洞或疏松类缺陷，内部冶金质量完全符合HB963—90铝合金铸件标准理想工艺的要求^[6]。与图9缺陷模拟结果对比可知，两者并没有出现较大的偏差，吻合情况良好。缺陷模拟结果显示，在铸件顶部薄壁处和较厚大的环形热节区域可能存在细微的缩松，而在探伤检测照片上完全没有缺陷存在，这主要是因为实际铸造过程存在一定波动性，与模拟结果不可能100%完全对应，只是处于一个稳定的概率值^[7]。因此，实际检测结果较好地验证了ProCAST工艺模拟的准确性以及认证能力，具有一定的实践指导作用。

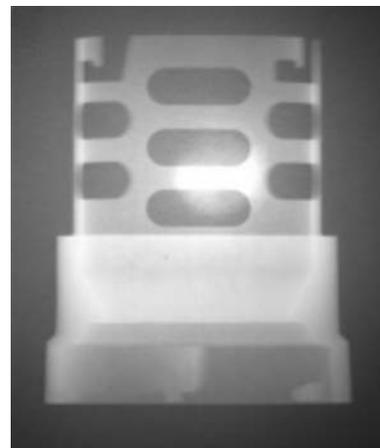


图11 薄壁铸件的X-射线探伤图像
Fig. 11 The X-ray flaw detection image

4 结论

(1) 真空吸铸方法可实现铸件薄壁化浇注, 能够较好地解决浇注薄壁件时易遇到充型困难、飞溅及易憋气等技术难题, 可成形轮廓完整、组织致密及品质优良的合格铸件。

(2) 立式单通道浇注方案要优于卧式双通道浇注方案, 铸件整个充型过程液流平缓顺畅, 避免了金属液的汇流和冲击现象发生, 此浇注系统可用于实践生产。

(3) 铸件在凝固过程中基本可实现顺序凝固, 浇注系统对铸件本体补缩充分, 但在顶部较薄位置易出现疏松, 故在实际铸造生产中可通过提高充型速度或合金浇注温度来解决。

参考文献:

- [1] 李元东, 刘兴海, 张心龙. 变形铝合金半固态近净成形研究进展 [J]. 特种铸造及有色合金, 2014 (5): 26-34.
- [2] 陈云龙. 真空吸铸充型能力及离心真空吸铸工艺的研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2011: 24-36.
- [3] 陈忠伟, 郝启堂, 介万齐. A357铝合金复杂薄壁铸件的反重力铸造研究 [J]. 铸造, 2004 (12): 38-41.
- [4] 冯坚, 张启勋, 吕衣礼. 浇注系统设计对反重力铸造薄壁板件凝固过程的影响 [J]. 铸造技术, 2004 (6): 36-39.
- [5] 郭志鹏, 熊守美, 曹尚铉. 铝合金ADC12Z高压铸造过程中铸件与铸型间界面热交换系数的研究 [J]. 金属学报, 2007 (1): 105-108.
- [6] 程运超, 杨光昱, 吕三雷. 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.
- [7] 刘铁军. 钛合金叶轮离心铸造数值模拟研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 45-47.

Study on Vacuum Suction Casting Process of Investment Mold Thin-Wall Precision Castings

LI Xin-lei, LI Shi-xin, YIN Cheng-ze

(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China)

Abstract:

In this study, the pouring system and exhaust system in the process of vacuum suction casting for the thin-wall feature parts of the investment mold were designed, and the filling process and possible casting defects were simulated by the numerical simulation software. The results show that the vacuum suction casting method can better solve some technical problems in the casting process such as filling difficulties, splashing and air holding, and can obtain qualified castings with complete contours and excellent surface quality; the vertical single-channel casting scheme is better than the horizontal double-channel casting scheme, and the filling process of the alloy liquid flow is smooth, which can avoid effectively the confluence and impact of liquid metal, thereby reducing the occurrence of casting defects.

Key words:

vacuum suction casting; thin-wall precision casting; gating system; numerical simulation; casting defects