

离心真空吸铸成形叶轮件凝固组织与性能研究

李新雷¹, 夏瑾², 郝启堂¹

(1. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

(2. 西安科技大学, 陕西 西安 710054)

摘要: 采用真空吸铸及离心真空吸铸工艺生产了铝合金叶轮铸件, 并研究了不同工艺对铸件凝固组织与力学性能的影响。结果表明, 与真空吸铸相比, 离心真空吸铸有利于提高金属液的充型流动和凝固补缩能力, 获得完整的铸件; 真空吸铸时施加离心旋转, 可在铸件凝固期间促进枝晶的断裂和游离, 抑制枝晶的生长, 减小二次枝晶间距并使枝晶尺寸具有较好的均匀性, 所获得铸件具有良好的力学性能。

关键词: 真空吸铸; 离心真空吸铸; 凝固组织; 力学性能

中图分类号: TG249

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)04-1319-06

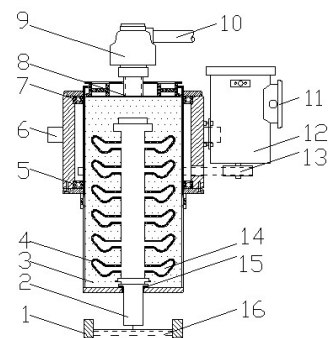
真空吸铸是一种在铸型型腔内抽真空产生压差, 使金属液自下而上地吸入型腔, 并凝固成形的铸造方法, 已在中小型复杂薄壁铸件的生产得到应用^[1-6]。但是该工艺仅应用了真空吸铸力实现金属液的充型及凝固过程, 在充型动力及凝固补缩方面存在一定的不足。离心真空吸铸是一种在真空吸铸时对铸型施加离心旋转, 使金属液在离心力作用下充型并凝固成形的新型复合铸造方法, 其原理如图 1 所示^[7,8]。该工艺方法对离心力的施加时间节点可灵活选择, 既可在充型开始时施加以提高金属液的充型能力, 也可以在充型完成后施加以增强补缩动力。与其它铸造工艺方法相比, 离心真空吸铸具有独特的优势, 不仅兼有离心铸造补缩能力强和真空吸铸充型能力优良的特点, 而且在离心过程中金属液的强对流运动可有效抑制树枝晶的生长、细化晶粒, 使铸件组织致密、铸造缺陷少^[9,10]。该方法可适用于轻质合金、铜合金、不锈钢、黑色金属等材料, 且适用的铸型材料也较为广泛, 如精铸模壳、石膏型、砂型、消失模等。为探索该工艺方法的实际应用, 本研究选用了常见的叶轮类铸件进行了工艺实践, 为该方法的应用与推广奠定基础。

1 实验

本实验选用的是汽车发动机涡轮增压器中的叶轮类精密铸件, 形状为轴对称的盘状件, 结构较为复杂, 外轮廓最大直径为 80 mm, 最小直径 11.5 mm, 高 57 mm, 17 个叶片, 曲面取向多变, 且叶片壁厚 1 mm。

该零件采用硅溶胶模型和发泡石膏制作铸型, 其几何模型和石膏型铸型如图 2 所示。

实验选用 ZL101A 铝合金, 熔炼时在 725 °C 进行精炼除气扒渣后, 静置 10 min, 然后在 740 °C 进行镗变质, 合金浇注温度为 700 °C。浇注前, 石膏型铸型及叶轮底盘所用冷铁的预热温度为 180 °C。在自主研发的离心真空吸铸装备上开展相关的工艺实验, 该装备可在铸型组装工位、浇注工位及倾转工位 3 种不同工位间实现吸铸室的上下举升、左右移动、旋转及倾



1-crucible; 2-riser tube; 3-sand; 4-precision molded case; 5-bearing; 6-support device; 7-bearing; 8-filtering apparatus; 9-dynamic sealing mechanism; 10-vacuum tube; 11-power supply; 12-centrifugal rotary mechanism; 13-driving belt; 14-mold cavity; 15-sealing gasket; 16-molten metal

图 1 离心真空吸铸原理图

Fig.1 Schematic diagram of centrifugal counter-gravity casting process

收稿日期: 2017-12-17

基金项目: 国家自然科学基金 (51375391); 中央高校基本科研业务费专项资金 (3102014KYJD036)

作者简介: 李新雷, 男, 1975 年生, 博士, 副教授, 西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072, E-mail: lixinlei@163.com

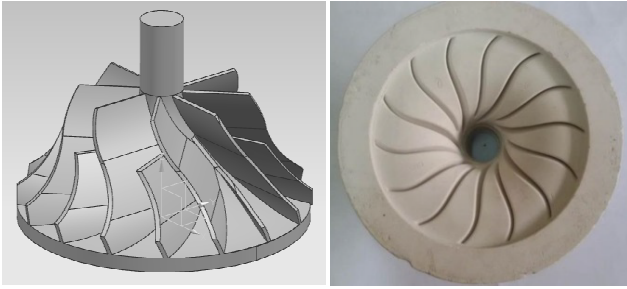


图 2 叶轮模型及石膏型壳

Fig.2 Impeller model and plaster type shell

转的动作控制,完成离心真空吸铸工艺的全流程控制。

设定的浇注工艺方案如下：(1) 工艺 I：普通真空吸铸,抽真空结束后计时 40 s,40 s 后取出铸型；(2) 工艺 II：先进行真空吸铸充型,真空吸铸结束后开启离心旋转,旋转过程保持真空环境,抽真空结束后计时 40 s,40 s 后取出铸型；(3) 工艺 III：先开启离心旋转,旋转稳定后开始对铸型室抽真空,进行吸铸充型,凝固过程保持铸型室真空环境,抽真空结束后计时 40 s,40 s 后取出铸型。结合前期工艺参数优化研究,3 种工艺方案中的吸铸速度控制在 100 mm/s,离心转速选取 100 r/min。

将浇注完后的铸件清理干净,分别在叶轮底盘中心和边缘位置切取试样块,使用金相砂纸和抛光机制备金相观察试样,采用 0.5%HF 酸腐蚀试样 20 s,腐蚀后立即用无水乙醇冲洗表面,用吹风机将试样表面吹干,在 OLYMPUS 显微镜进行微观组织观察。对 ZL101A 铝合金叶轮进行 T6 热处理:540 °C 固溶处理 8 h 后水淬,155 °C 下人工时效 6 h,用线切割在叶轮轴向中心部位切取板状拉伸试样,试样板长为 55 mm,标距长度为 23 mm,厚度为 1.5 mm,如图 3 所示。实验采用的拉伸仪器为电子万能材料试验机 (INSTRON-3382),采用的变形速度为 1 mm/min。

2 结果与讨论

2.1 不同工艺下叶轮充型过程的数值模拟

采用商业铸造模拟软件 ProCAST,对不同工艺的充型过程进行了数值模拟分析。图 4 是工艺 I 下叶轮铸件在不同时刻的充型过程示意图,从图中可以看出金属液充型平稳,自由液面波动很小,金属液面近似维持水平面向上充填,在金属液进入叶片部分后,叶轮中心位置的液面高度与叶片的液面高度基本一致。工艺 II 先进行真空吸铸充型,真空吸铸结束后开启离心旋转,离心转速 100 r/min,此工艺在凝固过程中增加了离心力作用,合金液充型流动过程模拟结果与工艺 I 基本一致。图 5 是工艺 III 条件下叶轮铸件在不同时刻的充型过程示意图,可以看出开始浇注时,直浇道内金属液流动变化较为平缓,液面前沿几乎保持水平状态,沿垂直方向向上流动,在液态金属进入叶片部分后,熔体由于受到真空吸力、离心力与科氏力的综合作用,使熔体向外侧叶片流动的加速度大于中心部位上升的加速度,从而导致熔体快速向沿叶片型腔向边缘充填,使叶片型腔内的液面高度高于中心部位液面,且中心部位液面上升的速度低于叶片型腔内液面直至金属液充满型腔。此外,与真空吸铸工艺 I 相比,工艺 III 由于离心力的作用,熔体充型速度快,相同充型时间下,型腔内充填的熔体体积要大于真空吸铸的。

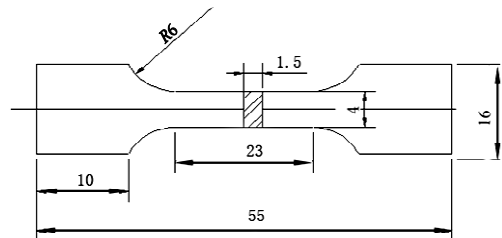


图 3 拉伸试样尺寸

Fig.3 Size of tensile test specimen

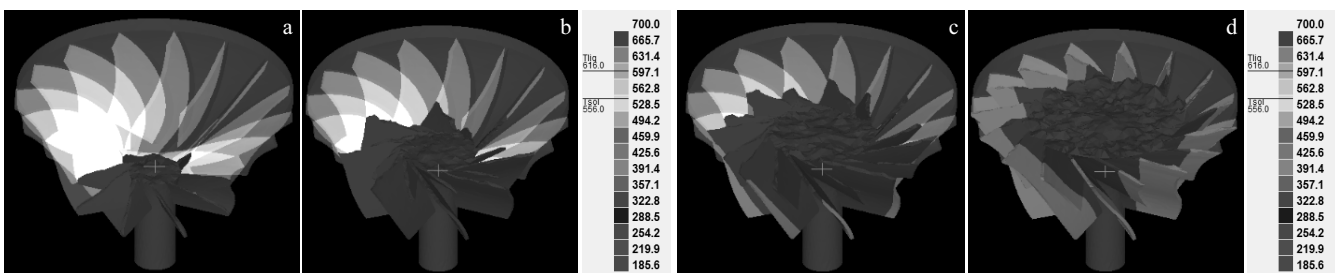


图 4 工艺 I 充型过程模拟结果

Fig.4 Filling process simulation for process I: (a) 0.4 s, (b) 0.75 s, (c) 1.35 s, and (d) 2.25 s

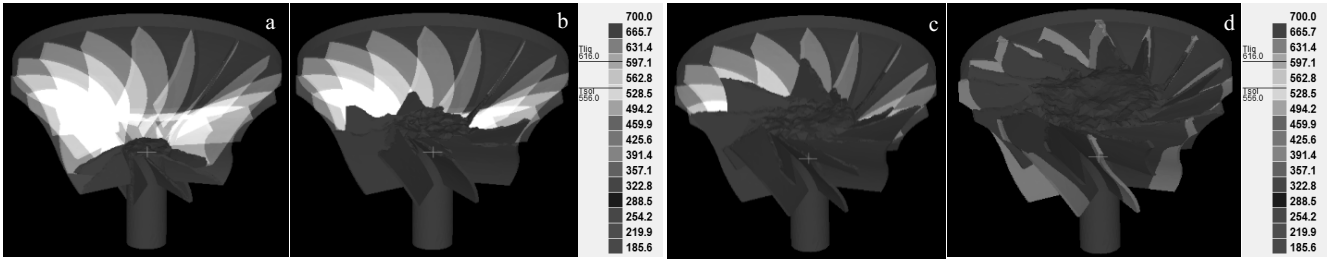


图 5 工艺 III 的充型过程模拟结果

Fig.5 Filling process simulation for process III: (a) 0.4 s, (b) 0.8 s, (c) 1.28 s, and (d) 2.08 s

图 6 是模拟软件对不同铸造工艺成形叶轮铸件时的铸造缺陷分布图，从图 6a 和 6b 中可以看出，工艺 I 在叶轮边缘局部和底盘中心部位产生了缺陷，这是由于叶轮充满时，叶片边缘和底盘中心区域熔体的温度下降很大，且真空吸铸后期的凝固补缩压力不大，容易导致补缩通道不畅通，从而在叶片边缘或底盘中心的位置产生冷隔或浇不足的铸造缺陷概率很大。从图 6c 和 6d 中可见工艺 II 的缺陷很多，多集中在叶片中间区域，说明若没有结合良好的铸造工艺设计，充

型结束后再施加离心力，铸型中部熔体在离心力作用下向外侧补缩，但是中部区域的凝固补缩能力反而在离心力的作用下减弱，致使中部区域没有得到很好的补缩，造成较多缩松、缩孔缺陷。从图 6e 和 6f 中可见，充型阶段就施加离心旋转，在离心转速和充型速度适合的情况下，可以取得较好的充型效果及良好的补缩效果，铸件中铸造缺陷少或是无铸造缺陷。

2.2 实际浇注的叶轮件

对不同工艺方案浇注成形的铝合金叶轮精铸件，采用线切割将不同铸件分别从中轴线处竖直切开，并观察铸件表面成形情况和纵剖面状态，如图 7 所示。从图中可以看出，工艺 I 得到的试样表面不够光滑，部分部位凝固不够彻底，工艺 II 和工艺 III 浇注得到的试样表面光滑，无明显裂纹。工艺 I 试样可以清晰地看到在叶片底部存在铸造缺陷，如图 7a 所示，与铸造模拟软件预测的位置较为相似，这主要是由于真空吸铸凝固补缩动力不足和叶轮边缘位置熔体温度较低造成。采用工艺 II 浇铸的叶轮，外观形状良好，纵剖面上未见有肉眼可见的铸造缺陷，可见离心力的施加对叶轮边缘外侧提供了较强的凝固补缩动力，减少了铸造缺陷。采用工艺 III 浇铸的叶轮，外观形貌完整，纵剖面上未见铸造缺陷，该工艺中离心力完整的参与金属液的充型过程，不但为金属液的充型提供动力，同时也增强了金属液的补缩能力。

2.3 叶轮件凝固组织

为探究真空吸铸力和离心力的施加对铸件凝固组织的影响，从叶轮底盘中心位置和叶片边缘位置切取制作金相试样，对比分析 I、II、III 3 种工艺下浇注试样的微观组织，分别如图 8 和 9 所示。

2.3.1 叶轮底盘中心的显微组织

从图 8 中可以看出，叶轮铸件的凝固组织主要由 α -Al 基体和共晶硅组成，但是由于叶轮底盘部位采用了冷铁，使金属液的冷却速率得到很大提高，一定程度上细化了枝晶。从图 8a 可以看出，真空吸铸工艺 I

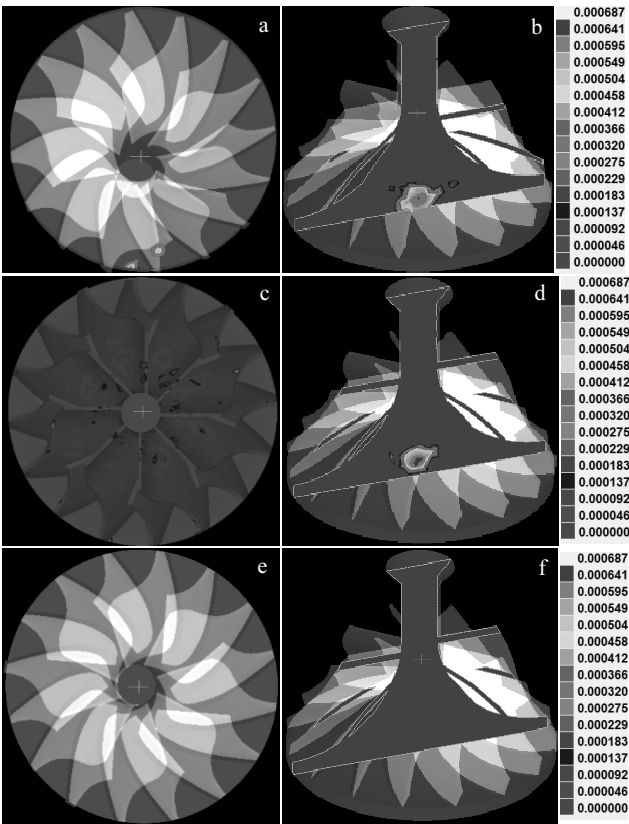


图 6 不同工艺下铸件凝固时的缺陷分布预测图

Fig.6 Defect distribution under different casting conditions:

(a, b) process I, (c, d) process II, and (e, f) process III

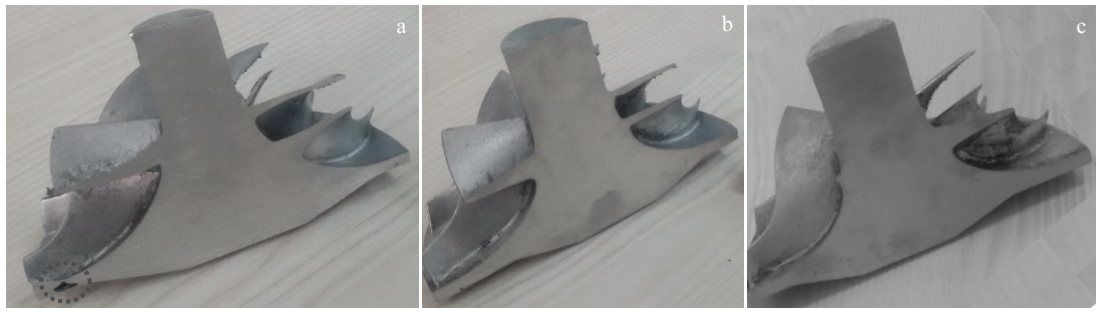


图 7 不同工艺下得到的叶轮铸件

Fig.7 Aluminum alloy impeller by different casting conditions: (a) process I, (b) process II, and (c) process III

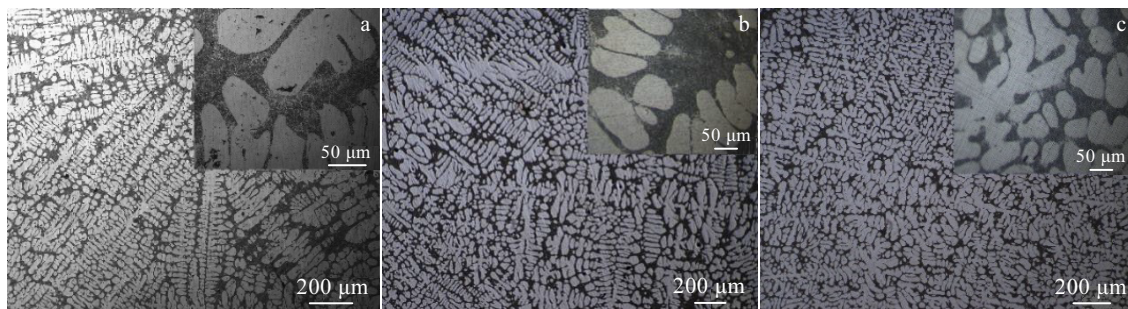


图 8 不同工艺下叶轮底盘中心部位微观组织金相照片

Fig.8 Dendritic structures of ZL101A aluminum alloy at the center of impeller chassis under different casting conditions: (a) process I, (b) process II, and (c) process III

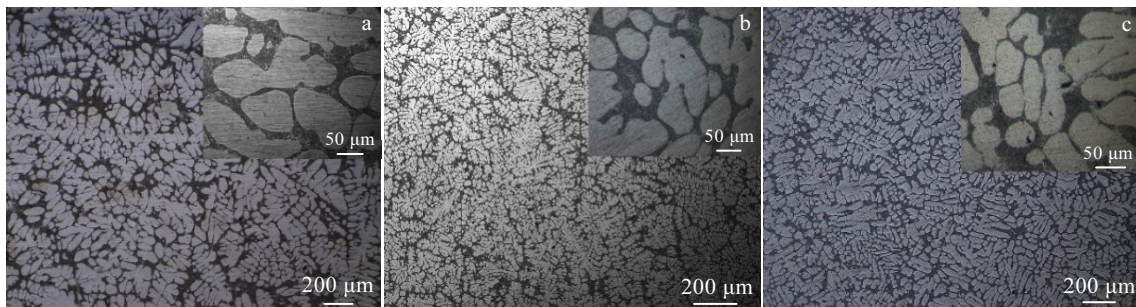


图 9 不同工艺下叶轮边缘部位微观组织金相照片

Fig.9 Dendritic structures of ZL101A aluminum alloy at the edge of the impeller under different casting conditions: (a) process I, (b) process II, and (c) process III

的底盘中心位置凝固组织中树枝晶粗大且分布不均匀，二次枝晶间距测量 10 次取平均值约为 28.20 μm。此外，该工艺下的 α-Al 基体上分布有不均匀气孔，呈梨形或扁平状。如图 8b 所示，离心真空吸铸工艺 II 下的试样，在充型结束后施加离心旋转，枝晶组织得到一定细化，二次枝晶间距测量 10 次取平均值约为 26.06 μm。这是由于凝固期间施加离心力，一方面会熔体内相邻质点间

产生压力差，增强金属液的挤压作用，起到强化补缩的效果；另一方面，离心力起到一定的机械震荡与破碎的作用，使枝晶破碎，限制了树枝晶的生长，一定程度上促进了晶粒细化。如图 8c 所示，离心真空吸铸工艺 III 下，充型开始施加稳定离心转速 100 r/min，二次枝晶间距约为 24.08 μm，枝晶更为细小。当充型时施加离心力，会增强熔体的流动能力，同时促进熔体内部对流，

并在凝固期间促进枝晶的断裂和游离，抑制枝晶的生长，从而减小合金二次枝晶间距。

2.3.2 叶轮边缘的显微组织

从图 9 可知，相对于叶轮底盘中心位置，叶轮边缘位置组织中枝晶形貌有了较大的改变，没有叶盘中心部位较为发达的枝晶组织，这主要是叶轮边缘区域冷却速率较高，且此处的金属液温度最低，所以枝晶较细。从图中也可以看出，与真空吸铸工艺 I 相比，工艺 II、III 所成形的叶轮组织，由于离心力的施加，凝固组织的枝晶更细，但是工艺 II 是在金属液充满铸型后施加的离心旋转，叶轮边缘金属液温度已比较低，虽能促进枝晶断裂游离，但作用效果并不非常明显，形成的枝晶组织也不均匀，而工艺 III 是在充型及凝固阶段持续施加离心旋转，离心力作用时间长，游离微晶多，抑制了枝晶的生长，细化枝晶效果更为明显。

2.4 铝合金叶轮的力学性能

采用线切割切取工艺 I、II、III 生产的叶轮铸件本体试样，采用万能实验机进行力学性能测试，其结果如图 10 所示。分析数据可以得出充型结束后施加离心力的工艺 II、III 试样，拉伸强度、屈服强度和延伸率均比单纯真空吸铸工艺有所提升，所得到的凝固组织也存在明显的不同，并且工艺 III 获得的铸件强度、塑性明显增加，延伸率也最大，这与该工艺下得到的铸件凝固组织枝晶粒细小有关。这说明，离心力的施加有助于提高铸件的最终力学性能。

但是，本实验不同工艺所获取铸件的本体切取试样的力学性能并不高，说明采用单个叶轮件在轮轴位置直接浇注铸件的方法，并未充分发挥离心真空吸铸在充型补缩方面的优势，应采用树状多模组件形式，设计独立的直浇道和横浇道，将铸件放置在横浇道的外侧，在施加离心力时，可强化充型动力和凝固补缩动力，从而更好地发挥真空吸铸和离心旋转工艺复合的优势。

对 3 种工艺的拉伸试样断口进行了扫描，获得拉

伸试样的断口形貌如图 11 所示。从图中可以看出，工艺 I 中断口形貌极其不平整，出现大小不一的孔洞和撕裂痕，其断裂机制以微孔聚集机理为主要方式。工艺 II 断口表面存在铸造孔洞，断口表面分布着大量的韧窝和明显的撕裂痕，韧窝小、深度浅，其表现为韧窝断裂与局部解理断裂的混合断裂特征。工艺 III 断口较为平整，同时伴有大量韧窝，韧窝的出现表明材料在局部范围内发生剧烈的剪切变形，断裂之前进行了更大程度的塑性变形，因而该工艺试样表现出了韧性好、强度、塑性高的特点。

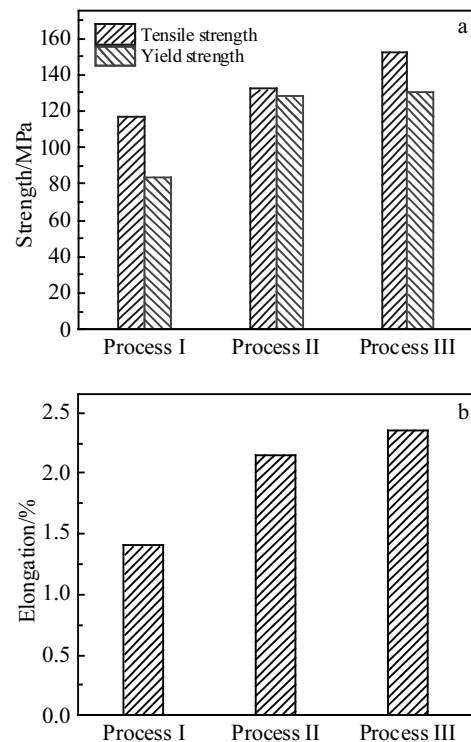


图 10 不同浇注工艺拉伸试样力学性能

Fig.10 Mechanical properties of specimens under different casting conditions: (a) tensile strength and yield strength and (b) elongation

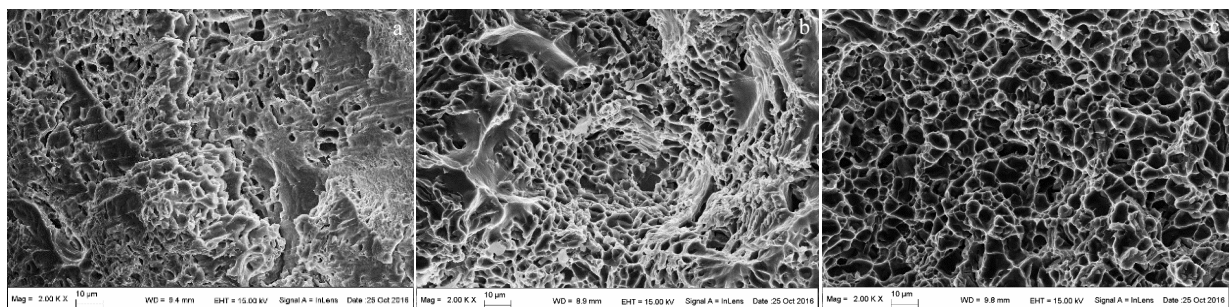


图 11 不同浇注工艺拉伸试样的断口形貌

Fig.11 Fracture morphologies of as-cast test samples under different casting conditions: (a) process I, (b) process II, and (c) process III

3 结 论

1) 采用真空吸铸或离心真空吸铸工艺浇注叶轮铸件, 均可以获得较为完整的铸件, 但真空吸铸工艺成形的叶轮件局部存在铸造缺陷, 而施加离心力有助于提高金属液的充型流动和凝固补缩能力, 获得优质铸件。

2) 与真空吸铸相比, 无论是充型结束后还是充型开始时就施加离心旋转, 均可在铸件凝固期间促进枝晶的断裂和游离, 抑制枝晶的生长, 减小合金二次枝晶间距, 并细化了枝晶, 而充型开始时就伴随离心旋转的凝固组织枝晶尺寸更细小、均匀性更好。

3) 3 种工艺生产的叶轮铸件中, 真空吸铸充型时就施加离心旋转工艺下获得的铸件抗拉强度、屈服强度、伸长率最大, 证实离心力的施加可有效提高铸件的力学性能。此外, 对于小型复杂铸件在工艺方案设计时应采用树状组模设计并将模组放置在直浇道外侧, 以便充分发挥离心真空吸铸的技术优势。

参考文献 References

[1] Gilles D J. *Hitchiner's CLA Process*[R]. United States:

Hitchiner Manufacturing Co Inc, 2008

- [2] Kashiwai S, Ohnaka I, Kimatsuka A *et al. International Journal of Cast Metals Research*[J], 2005, 18(3): 144
- [3] Chandley G D. *Materials Research Innovations*[J], 1999, 3(1): 14
- [4] Mao Zhonghan(毛忠汉), Zu Guoxing(祖国兴). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 1997, 26(1): 38
- [5] Teng Haitao, Li Tingju, Zhang Xiaoli *et al. Journal of Materials Science*[J], 2009, 44(20): 5644
- [6] Xiong Yancai(熊艳才), Zhou Yongjiang(周永江), Hong Runzhou(洪润洲). *Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2000(5): 18
- [7] Farkas A P. *US Patent*, 6499529B1[P], 2002
- [8] Chen Yunlong(陈云龙), Hao Qitang(郝启堂). *Foundry*(铸造)[J], 2011, 60(2): 153
- [9] Chen Shanxian(陈善贤), Hao Qitang(郝启堂), Li Xinlei(李新雷) *et al. Foundry*(铸造)[J], 2013, 62(5): 369
- [10] Li Xinlei, Hao Qitang, Miao Xiaochuan *et al. China Foundry*[J], 2014, 11(1): 14

Solidification Microstructure and Properties of Aluminum Alloy Impeller Produced by Centrifugal Counter-Gravity Casting

Li Xinlei¹, Xia Jin², Hao Qitang¹

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

(2. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The solidification microstructure and properties of aluminum alloy impeller produced by centrifugal counter-gravity casting were investigated. For comparison, vacuum suction casting was also used. Applying centrifugal force during centrifugal counter-gravity casting is found to have a significant effect on α -Al dendrites, which are fragmented into smaller spherical particles. Furthermore, applying centrifugal force at the early stage of centrifugal counter-gravity casting also improves the filling and feeding capacity during solidification and thereby reduces the formation of defects such as shrinkage porosity and shrinkage cavity. This investigation demonstrates that centrifugal counter-gravity casting is very promising to produce high quality complex thin-walled castings.

Key words: vacuum suction casting; centrifugal counter-gravity casting; solidification structure; mechanical property

Corresponding author: Li Xinlei, Ph. D., Associate Professor, State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China, Tel: 0086-29-88494276, E-mail: lixinlei@163.com