

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.06.001

底漏式真空吸铸铝合金成形缺陷仿真与实验研究

余宽平, 何涛, 霍元明, 赖磊捷, 潘婷婷

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要:为解决底漏式真空吸铸成形中铸件的缩孔缺陷问题,利用 ProCAST 对铝合金成形的凝固过程进行了模拟,研究了真空吸铸的主要参数吸口直径、压差和冷却速度对铸件成形缺陷的影响规律,并对缺陷形成的原因进行了分析。结果表明:随着吸口直径增大,凝固时间缩短,铸件缩孔数量先减少后增多;随着压差增大,铸件凝固时间缩短,缩孔数量先减少后变化不大;随着冷却速度增大,凝固时间明显缩短,缩孔呈现逐渐增多且密集的趋势。在吸口直径为 3 mm,压差为 0.05 MPa,铸模为钢模时得到铸件缺陷较少。此外,在压差为 0.05 MPa,铸型为钢模以及吸口直径分别为 2,3 和 4 mm 的条件下进行了实验,对铸件宏观缩孔和显微疏松进行了分析,研究表明铸件成形缺陷变化规律与模拟结果一致。

关键词:铝合金;真空吸铸;数值模拟;ProCAST 软件;吸口直径;压差;冷却速度

中图分类号: TG249.9 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2018)06-0001-06

Simulation and Experiment of Defects in Bottom Vacuum Suction Casting of Aluminum Alloy

YU Kuanping, HE Tao, HUO Yuanming, LAI Leijie, PAN Tingting

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: The solidification process of Al-Si-Cu alloy was simulated by ProCAST in order to solve the shrinkage defect in vacuum suction casting by ProCAST. The influence of main parameters such as suction diameter, pressure difference and cooling rate on the forming defects of the casting was studied. The causes of defect formation were analyzed. The results show that with the increase of suction diameter and solidification time, the number of shrinkage holes decreases first and then increases; with the increase of pressure difference, the solidification time of casting shortens, the number of shrinkage holes decreases first and then changes little; with the increase of cooling rate, the solidification time is obviously shortened, and the shrinkage holes are gradually increasing and dense. When the diameter of the suction port is 3 mm, the pressure difference is 0.05 MPa, the casting forming defect is less when the casting mold is a steel mold. In addition, when the pressure difference is 0.05 MPa, the mould is copper mould and the suction diameter is 2, 3 and 4 mm respectively, the macro shrinkage hole and micro-porosity of the casting are analyzed. The change of forming defects of the casting is consistent with the simulation results.

Keywords: Aluminium alloy; vacuum suction; numerical simulation; ProCAST; suction diameter; pressure difference; cooling rate

铝合金具有密度小、导热性好、塑性好和价格低廉等优点,广泛应用于航空航天、交通运输、轻工建材以及日用机电产品等领域,在轻合金中应用最广、用量最

多,对于其性能业界要求也越来越高^[1-3]。目前铝合金铸造方式主要有重力铸造、压力铸造和反重力真空吸铸等^[4]。在反重力真空吸铸的基础上,苏彦庆等提出

收稿日期:2018-06-14;修回日期:2018-09-10

基金项目:上海市科委地方能力建设重点项目(16030501200);国家自然科学基金资助项目(51605275);上海工程技术大学研究生科研创新项目(17KY0106)。

第一作者简介:余宽平(1994),男,山西临汾人,硕士研究生,主要研究方向为真空吸铸成形控制与仿真。通信作者:何涛(1979),男,安徽枞阳人,博士,副教授,主要研究方向为机器人技术、特种成形等。E-mail:hetao_cn@126.com

了底漏式真空吸铸,该工艺使液态金属在重力与负压的耦合作用下完成充型,最终在真空及低压状态下凝固。底漏式真空吸铸工艺充型动力大,易于成形复杂薄壁零件,且增强了合金液的补缩能力,使铸件组织更加致密^[5,6]。但是在实验过程中,发现由此工艺成形的铸件经常存在不同程度的缩孔缩松缺陷,对铸件力学性能有严重损害,因此研究底漏式真空吸铸成形机理,分析其缺陷形成规律,是非常有现实意义的。课题组通过数值模拟探究了底漏式真空吸铸成形机理,并分析了吸口直径、负压差和冷却速度对铝合金真空吸铸成形缺陷的影响规律,最后在不同吸口直径下进行了实验,从宏观缩孔和显微疏松对铸件的缺陷进行分析以验证模拟结果的准确性。

1 底漏式真空吸铸建模

1.1 底漏式真空吸铸工艺介绍

实验设备结构如图 1 所示。底漏式真空吸铸实验流程如下:①根据表 1 所示成分配置材料,将配置材料放入有氩气保护的电弧熔炼室的熔炼坩埚中;②合金先在熔炼坩埚中熔炼 2~4 次,打开磁搅拌开关,在磁搅拌的作用下继续熔炼 2~3 次,直至合金锭中成分均匀;③使用机械手将熔炼充分的合金锭翻转到吸铸坩埚中,将其熔炼至液态时,打开吸铸阀,在重力和吸铸室与熔炼室的负压差共同作用下,合金液通过石墨吸口迅速进入吸铸室中的金属铸型之中,完成充型,最后在处于真空和低压状态中的金属型模具中冷却凝固。

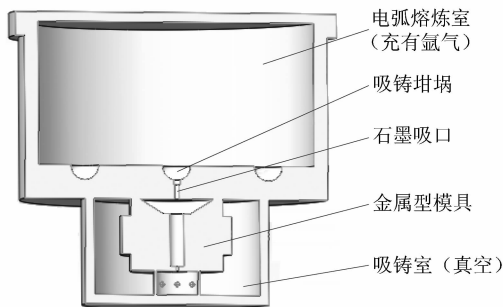


图 1 底漏式真空吸铸设备结构

Figure 1 Structural of bottom vacuum suction casting equipment

表 1 铝合金成分

Table 1 Aluminium alloy composition %

Si	Cu	Mg	Ti	Fe	Al
7.0	4.5	0.15	0.1	0.1	余量

1.2 有限元网格划分

图 2 所示为铸件三维模型及铸件与模具网格划

分。铸件总长为 80 mm,下部直径 10 mm,上部为圆形浇口,直径 30 mm。利用 ProCAST 软件对铸件及模具进行面网格和体网格的划分,模型尺寸与实际尺寸一致。为了保证模拟精度,同时考虑计算效率,设置铸件的网格长度为 1 mm,模具的网格长度为 2 mm。

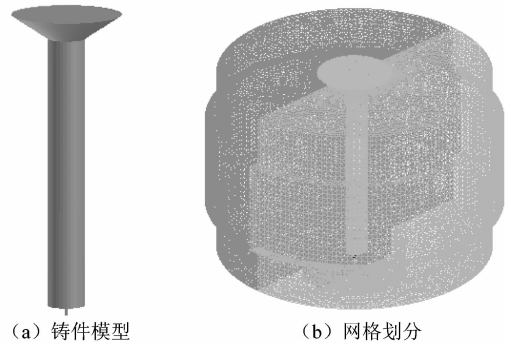


图 2 铸件三维模型及网格划分

Figure 2 3D model and mesh division of castings

1.3 铸件及模具材料的热物性参数

所选模具材料分别为钢 H13、石墨和黄铜 H59,参照 GB/T 2040—2008,所选铸件材料为 Al-Si-Cu 合金,铸件和模具材料主要热力学和动力学参数都可参考文献[7]。由于文献[7]中 Al-Si-Cu 合金材料在不同温度下的参数不够详细,课题组使用 ProCAST 软件材料数据库计算加以补充,其计算得到的液相线和固相线温度分别为 614 和 553 °C,与文献中的 615 和 555 °C 基本一致,因此认为 ProCAST 对铝合金材料的热物性参数计算结果是可信的。最终得到铸件部分热物性参数如表 2 所示。

表 2 铝合金铸件的热物性参数

Table 2 Thermophysical parameters of aluminium alloy castings

温度/°C	热导率/ (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	热焓/ (kJ · kg ⁻¹)	密度/ (kg · m ⁻³)	黏度/ (Pa · s)
27	121	13	2 695	—
220	133	101	2 656	—
500	144	272	2 593	—
553 (固相线)	135	835	2 501	—
600	114	944	2 459	0.001 56
614 (液相线)	86	1 048	2 421	0.001 46
850	94	1 328	2 354	0.000 91

1.4 其余边界条件的设置

据以往经验,结合实际情况,设置模拟浇注温度为 670 °C^[8];由于吸铸室为真空,在此工艺过程中传热主要为铸件与模具内侧的热传导和模具外壁与吸铸室壁之间的辐射换热。其中,模具外壁辐射率取 0.4,吸铸

室壁辐射率取 0.5,它们之间辐射换热的辐射率取 0.5^[9-10];金属与铸型界面传热包括金属与铸型的接触导热、金属与铸型间隙中气体的导热以及热辐射等,是一个非常复杂的过程,在数值模拟过程中可将金属与铸型接触界面假定为理想状态;则有^[11]:

$$q = h_i(T_{w1} - T_{w2}) + \sigma\varepsilon(T_{w1}^4 - T_{w2}^4) \quad (1)$$

式中: q 为热流密度, $^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^{-2}$; h_i 为传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_{w1}, T_{w2} 分别为铸件和铸型表面温度, $^{\circ}\text{C}$; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数, 取值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; ε 为辐射率。

确定不同类型模具与铸件间的换热系数^[12-13],设置石墨吸口直径、负压差和冷却速度如表 3 所示。

表 3 模拟所用工艺参数

Table 3 Process parameters for simulation

工艺参数	吸口直径/mm	负压差/MPa	冷却速度/模具材料
1	2	0.02	钢模
2	3	0.05	石墨铸型
3	4	0.08	铜模

2 模拟结果及分析

2.1 吸口直径对铸件成形缺陷的影响

图 3 和图 4 所示为浇注温度 670°C , 铸型为钢模, 铸型温度 20°C , 压差 0.05 MPa, 吸口直径分别为 2, 3 和 4 mm 的模拟结果。

图 3 为不同吸口直径下铸件各部位凝固时间云

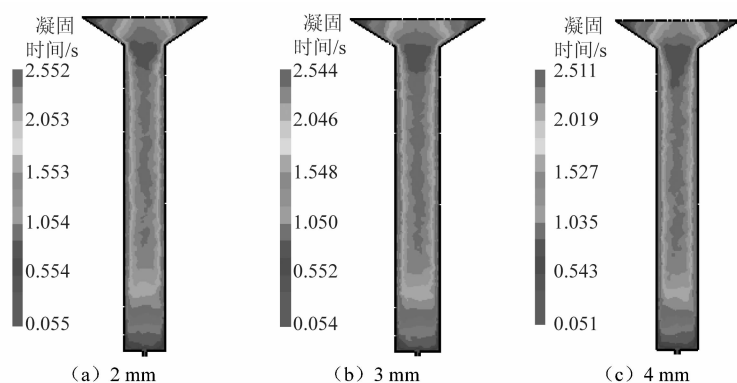


图 3 不同吸口直径的凝固时间

Figure 3 Solidification time of different suction diameters

2.2 压差对铸件成形缺陷的影响

图 5 和图 6 所示为浇注温度 670°C , 铸型为钢模, 铸型温度 20°C , 吸口直径 3 mm, 压差分别为 0.02, 0.05 和 0.08 MPa 的模拟结果。

图 5 所示为不同压差大小时铸件各部位的凝固时间。容易看出, 随着压差增大, 总凝固时间缩短, 铸件

图。可以看出, 铸件凝固顺序是自下而上、自外向内的, 与实际凝固过程相同, 这也在一定程度上证明了模拟的可靠性。此外, 易发现随着吸口直径增大, 总凝固时间缩短, 铸件上部最后凝固的区域也逐渐增大, 这有利于补缩通道的保留, 减小下部产生缩孔缩松的可能。

图 4 为不同吸口直径下铸件缩孔缩松的情况预测。容易得出, 随着吸口直径增大, 总缩孔面积先减小后增大, 在吸口直径为 3 mm 时缩孔缩松面积最小; 最大缩孔缩松分数在吸口直径为 2 mm 时为 40%, 吸口直径为 3 mm 时为 20%, 吸口直径为 4 mm 时为 46.67%, 也是随着吸口直径增大先减小后增大。整体而言, 铸件成形缺陷在吸口直径为 3 mm 时是最少的。这是由于真空吸铸时, 金属液进入铸型时可视为射流, 会有反向充填现象的出现, 而反向充填可能导致出现冷隔及缩松等缺陷^[14]; 又因为射流宽度随吸口直径增大而增大, 射流宽度增大则会减少反向充填出现的概率。所以缩孔缩松趋势在吸口直径 3 mm 时比 2 mm 时小。在吸口直径 4 mm 时又增大的原因是此时吸口直径大小与铸件直径大小之比增大, 金属液会更早接触到模具内壁, 充型过程中在模具内壁就形成一层凝壳, 影响铸件各部位的凝固顺序, 导致缩孔缩松趋势增加。此外, 吸口直径太大在实际中也影响熔炼及吸铸过程, 容易使合金液在吸铸之前就因为重力原因流入下方铸型。因此, 综合考虑, 吸口直径 3 mm 为适宜的大小。

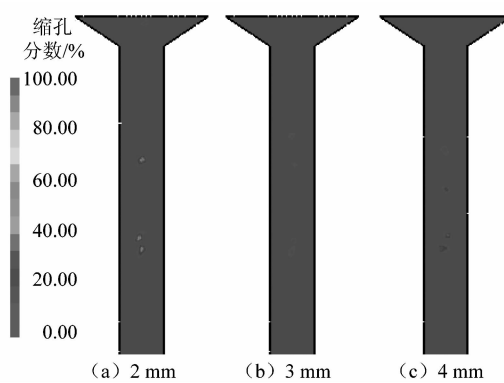


图 4 不同吸口直径的缩孔缩松情况

Figure 4 Shrinkage porosity of different suction diameters

最后凝固区域面积先减小后增大, 且在压差为 0.05 MPa 时凝固时间最长的 2 个梯度所占区域明显缩小, 在压差为 0.02 和 0.08 MPa 凝固时间在第 2 梯度的区域有明显的断层, 且断层区域面积较大。由于铸件缺陷形成位置往往都是最后凝固的区域, 因此在断层区域较易产生缺陷。

图 6 所示为不同压差下铸件的缩孔缩松位置分布及缩孔缩松分数。易发现,缩孔缩松面积在压差为 0.02 MPa 时最大,0.08 MPa 次之,0.05 MPa 时最小且差别较大;最大缩孔缩松分数在压差为 0.02 MPa 时达到 53.33%,0.05 MPa 时不足 20%,0.08 MPa 时为 33.33%。容易得出,压差大小为 0.05 MPa 时,铸件成形缺陷最小。分析其原因主要是在吸口直径一定的情况下,压差越小,充型速度越慢,单位时间内进入铸型内的合金液也就越少,由于石墨模具导热性较好,且初始温度仅为 20 ℃,合金液冷却较快,易发生铸件某部位上部冷却较快,而使下部区域出现热节的现象,而热节处得不到补缩就会出现缩孔缩松。如图 5(a) 所示,铸件中部均有一区域凝固时间较上部稍长,因此在此部位易产生缺陷,而在图 6(a) 对应位置确实产生了

较明显的缩孔缺陷。因此在压差增大至 0.05 MPa 时,因补缩能力提高,基本实现了顺序凝固,缩孔趋势减小;而压差增大至 0.08 MPa 时缩孔趋势又增大是因为充型速度过快时,充型过程中产生的涡流区域增大^[15],难以实现顺序充填,也易导致热节的产生,从而在该部位出现缩孔缩松。

如图 7 所示为不同压差时模拟时间为 2.75 s 铸件不同部位的温度分布情况,发现图 7(a) 中铸件中下部出现较大面积热节,此时热节周围温度已低于固相线,内部区域就会因为得不到补缩而产生缩孔缩松,其位置与图 6(a) 和 7(c) 中预测位置相同。而在图 7(b) 中可以看出合金液基本实现了自下而上、自外向内的顺序凝固,因而产生缩孔缩松较小与图 6(b) 所示结果一致。

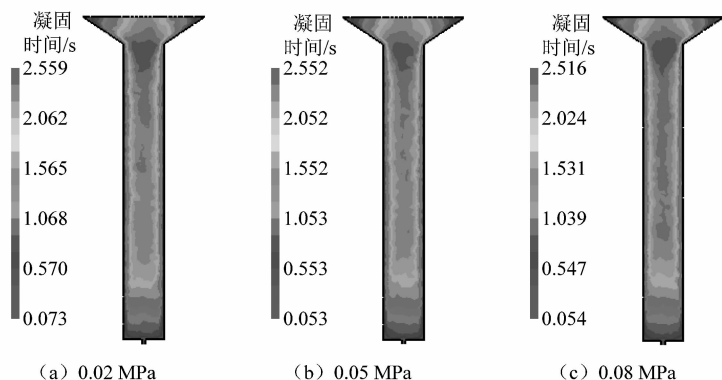


图 5 不同压差的凝固时间

Figure 5 Solidification time under different pressure

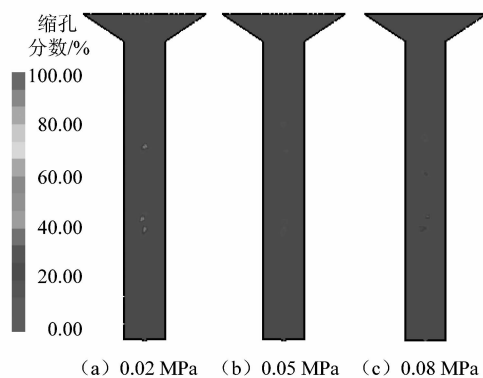


图 6 不同压差的缩孔缩松情况

Figure 6 Shrinkage porosity under different pressure

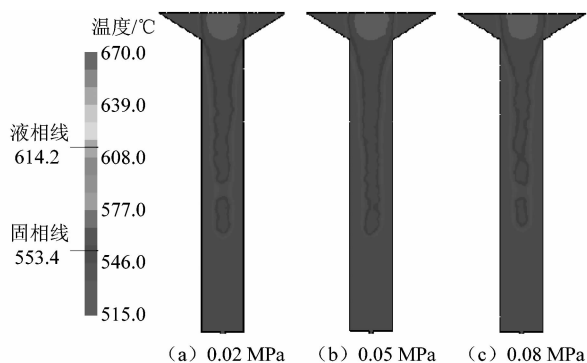


图 7 模拟时间 2.75 s 时不同压差的铸件各部位温度分布情况

Figure 7 Temperature distribution in different parts of casting under different pressure difference at simulated time 2.75 s

2.3 冷却速度对铸件成形缺陷的影响

图 8 ~ 9 所示为浇注温度 670 ℃,铸型温度 20 ℃,

吸口直径 3 mm,压差 0.05 MPa,铸型分别为钢模、石墨模型和铜模的模拟结果。由 ProCAST 材料数据库可知,在合金液固相线到液相线的温度范围内,不同模具材料平均导热系数:H13 钢模为 28 W/(m·K),石墨模型为 45 W/(m·K),H62 黄铜模具为 114 W/(m·K)。由于模拟中所用铸件材料相同,所以合金液的冷却速度会随着模具导热系数增大而增大。

由图 8 可以看出,冷却速度对铸件凝固时间影响较大,随着冷却速度增大,铸件总凝固时间大大缩短,且最后凝固区域的面积越小,其位置也由浇口向下移动。这是因为冷却速度越高,合金液热量散失加快,外部合金液迅速冷却使内部合金液的冷却加快。在浇口上表面与环境之间的换热和外围合金液的冷却共同作用下,浇口处的合金液冷却速度加快。图 10 所示为刚充型结束时不同冷却速度下铸件的凝固分数,可以看出在铸模为钢模时仅有底部边缘区域凝固分数为

20%以上;铸模为石墨铸型时,铸件与铸型接触的外侧凝固分数已达到20%,底部最高达到53.33%;而铜模铸件与铸型接触的最外侧凝固分数已经超40%。由

此可见,冷却速度对于铸件凝固速度影响较大。而一般认为,合金液液流头部的凝固分数达到20%时,充型将无法进行。

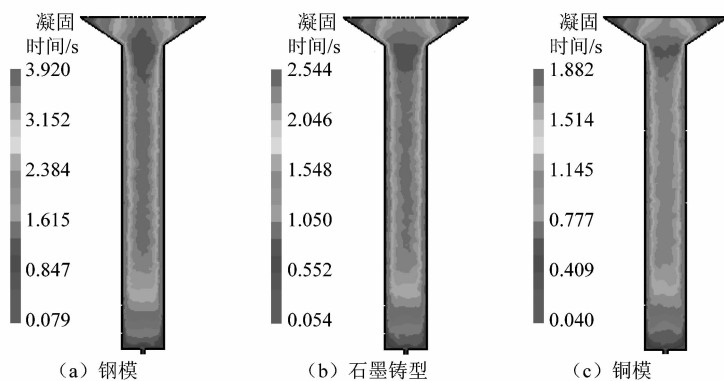


图8 不同冷却速度的凝固时间

Figure 8 Solidification time at different cooling rates

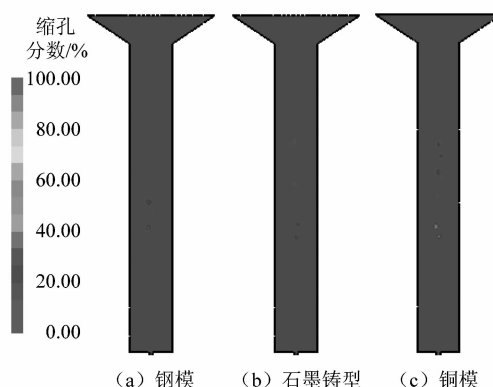


图9 不同冷却速度的缩孔缩松情况

Figure 9 Shrinkage porosity at different cooling rates

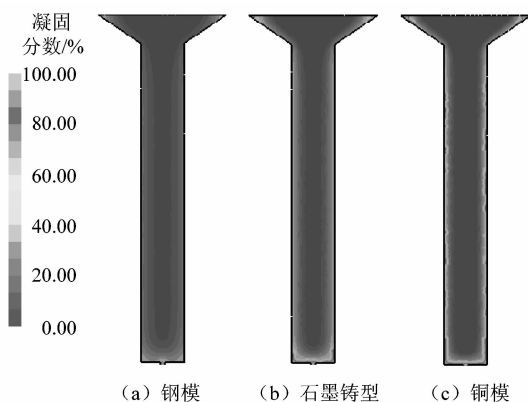


图10 充型结束时不同冷却速度的铸件凝固分数

Figure 10 Solidification fraction of casting at different cooling rates at end of filling mould

图9所示为对不同冷却速度下铸件缩孔缩松情况的预测。易得出,随着冷却速度增大,缩孔缩松面积明显增大,且最大缩孔分数也增大:在铸模为钢模时最大缩孔分数仅为20%,铸模为石墨铸型时则达到46.67%。这是因为模拟铸型温度较低,仅为20℃,而随着冷却速度增大,合金液散热加快,收缩也很快,难以实现顺序凝固,易导致缺陷的产生。此外,合金液随着温度的迅速降低其流动性会受到很大影响,导致补缩能力降低,形成缩孔缩松等。虽然随着冷却速度增大,铸件成形缺陷也增大,但是快速冷却得到的铸件一般具有晶粒细小,组织致密,力学性能较好的优点,可以在铸型相应位置设置冒口或者提高铸型温度来减小缺陷。

3 实验分析

考虑实际设备情况,课题组选择在压差为0.05 MPa,铸模为钢模,吸口直径分别为2,3和4 mm的条件下进行实验,分别从宏观缩孔缩松和显微疏松对铸件成形缺陷进行分析。依据前人经验及模拟结果可知铸件的缩孔缩松缺陷一般是在铸件的轴心部位,因此为了直观地观察铸件的宏观缩孔缩松,课题组使用DK7632 数控线切割机在铸件的轴心部位切割厚度为1 mm的薄片,结果如图11所示。为观察铸件显微疏松,使用线切割在铸件轴心部位切割得到2 mm × 2 mm × 2 mm的试样,并用扫描电镜进行观察,结果如图12所示。

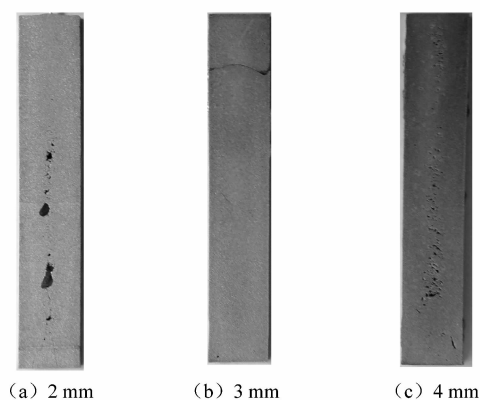


图11 不同吸口直径铸件缩孔缩松情况

Figure 11 Shrinkage porosity of castings with different suction diameters

由图11可以看出,在吸口直径为2 mm时,铸件的中下部位出现明显的缩孔,且缩孔面积较大,此外还

有较少的缩松出现,且都分布在铸件中心部位;而吸口直径 3 mm 时,铸件整体未出现明显缩孔缩松的缺陷,仅在中下部的有细微缩松出现;吸口直径为 4 mm 时,铸件未出现大的缩孔,但是有较大面积的缩松出现。实验结果显示的使用底漏式真空吸铸工艺成形铸件的缩孔缩松缺陷规律与模拟所得出的规律基本符合。

图 12(a)中,吸口直径为 2 mm 时,显微疏松面积

较大且数量较多,并集聚形成较大孔洞状,对基体的连续性造成极大破坏,恶化铸件性能。当吸口直径为 3 mm 时,显微疏松数量相比于 2 mm 时大幅下降,且散而细小,分布于晶粒间隙,缺陷较小。当吸口直径为 4 mm 时,显微疏松数量较 3 mm 时有所增多,但疏松呈细小孔状,未形成较大的缩孔。综合来看,随着吸口直径增大,铸件显微疏松的缺陷先减小后增大,与模拟结果也基本符合。

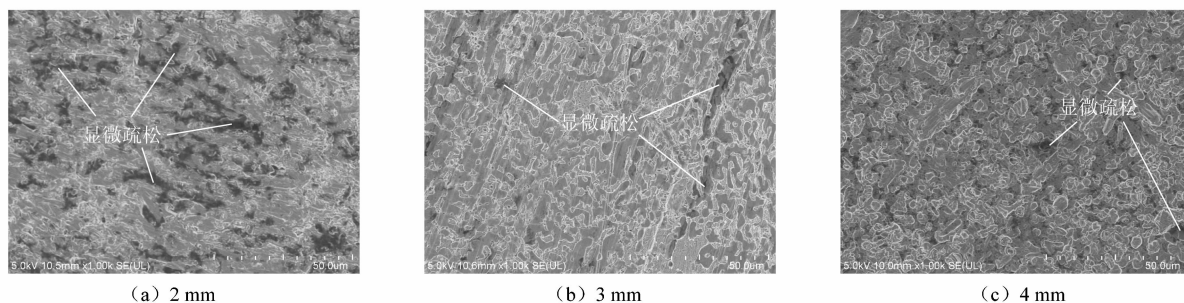


图 12 不同吸口直径铸件的显微疏松情况

Figure 12 Microporosity of castings with different suction diameters

4 结论

1) 随着吸口直径增大,铸件的凝固时间缩短,缩孔缩松缺陷先减小后增大;随着压差增大,铸件凝固时间也逐渐缩短,缩孔则呈现先减小后变化不大的趋势;而随着冷却速度增加,凝固时间大幅度缩短,缩孔缩松数量增加且愈显密集。

2) 铸件缩孔缩松缺陷基本上都出现在铸件的轴心部位。当吸口直径为 3 mm,熔炼室与吸铸室压差为 0.05 MPa,铸型为钢模时,利用底漏式真空吸铸工艺成形得到的铸件缩孔缩松的缺陷较小。

3) 当压差为 0.05 MPa,铸型为铜模,吸口直径分别为 2,3 和 4 mm 时,实验得到铸件的宏观缩孔和显微疏松呈现随着吸口直径增大呈现先减少后增多的趋势,其变化规律与模拟结果基本符合,证明了模拟的准确性。

参考文献:

- [1] 李斌,许庆彦,潘冬,等. 低压铸造 ZL114A 铝合金微观组织模拟[J]. 金属学报,2008,44(2):243.
- [2] 黄娜莎,倪益华,杨将新,等. 铝合金表面改性技术的研究与进展[J]. 轻工机械,2010,28(4):4.
- [3] 陈小明,宋仁国,李杰. 7xxx 系铝合金的研究现状及发展趋势[J]. 材料导报,2009,23(3):67-70.
- [4] 袁贝,廖敦明,周建新. 铝合金铸造工艺 CAD/CAE 技术的研究与应用[J]. 特种铸造及有色合金,2012,32(4):32.

- [5] 苏彦庆,叶喜葱,郭景杰,等. 金属型底漏式真空吸铸钛基合金的精密铸造方法:CN200810064180.4 [P]. 2008-08-20.
- [6] 骆良顺,韩宝帅,王亮,等. 工艺参数对真空吸铸 TiAl 基金连杆铸造过程的影响[J]. 材料科学与工艺,2013,21(4):76-79.
- [7] 中国机械工程学会. 中国材料工程大典:材料铸造成形工程[M]. 第 18 卷. 北京:化学工业出版社,2006:263.
- [8] ZHANG H G, HU Q X. Study of the filling mechanism and parameter optimization method for vacuum casting[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2015, 83 (5/6/7/8): 711 - 720.
- [9] 潘利文,郑立静,张虎,等. Niyama 判据对铸件缩孔缩松预测的适用性[J]. 北京航空航天大学学报,2011,37(12):1534-1540.
- [10] TENG Haitao, LI Tingju, ZHANG Xiaoli, et al. Mold-filling characteristics and solidification behavior of magnesium alloy in vacuum suction casting process[J]. Journal of materials science, 2009,44(20):5644-5653.
- [11] 熊守美,许庆彦,康进武. 铸造过程模拟仿真技术[M]. 北京:机械工业出版社,2004:48-52.
- [12] 夏巍. 铝合金重力铸造过程中铸件:模具界面换热系数反求及其在仿真中的应用[D]. 长沙:湖南大学,2013:38-42.
- [13] 刘桐旺. 金属型铸造凝固过程中界面热交换系数的研究[D]. 重庆:重庆大学,2016:36-39.
- [14] 叶喜葱,赵光伟,吴海华,等. 真空吸铸过程中 TiAl 合金熔体流动状态[J]. 航空材料学报,2015,35(2):28-33.
- [15] 洪润洲,周永江,姚惟斌. 真空吸铸条件下充型速度对薄壁铝合金铸件内部质量的影响[J]. 材料工程,2006(增刊 1):294-296.