

ZL114A 铝合金预置石膏型芯熔模精铸工艺探索

高沛莹¹, 王狂飞¹, 刘 阳², 杨林杰¹, 孙尚松², 李 伟²

(1. 河南理工大学材料学院, 河南焦作 454000; 2. 河南正旭科技股份有限公司, 河南焦作 454000)

摘要: 铝合金石膏型带有管状回路的精铸件, 制蜡模时因抽芯困难常采用预置可溶型芯方法予以解决, 但精铸件很容易出现铸瘤、回路堵塞等缺陷, 本文对此进行了改进, 采用预置石膏型芯, 并比较了两种方案浇注效果, 结果表明预置石膏型芯确实可行。

关键词: 铝合金; 石膏型; 管状回路; 预置石膏型芯

石膏型精铸可整体铸出复杂、薄壁、精密的铝合金铸件, 且铸件表面质量和内部质量较高, 因而, 在兵器、航天航空等行业得到广泛应用^[1-10]。对于内腔有复杂回路结构的石膏型精铸件, 因制蜡模时抽芯困难, 常采用可溶型芯方法来成形^[1, 9], 可溶型芯精铸路线如图1a所示。灌浆前, 要对可溶型芯进行溶失, 在灌浆时所留空间由铸造粉浆料充填, 在随后脱蜡及浇注环节, 很可能因石膏强度不够, 造成回路中石膏芯偏移甚至断裂。针对上述问题(①压制蜡模回路抽芯问题, ②型芯强度不足问题), 是否可采用石膏型芯解决有待进一步研究, 为此, 设计了图1b所示预置石膏型芯的熔模精铸路线来考证。本文以某铝合金石膏型精铸件为例, 通过比较可溶型芯或自制石膏型芯等两种预置型芯的效果, 找到石膏型复杂回路件精铸问题的解决方法。

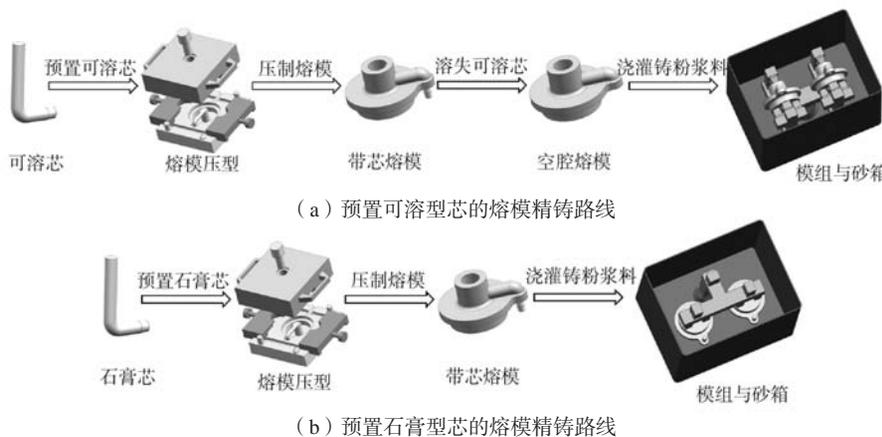


图1 预置型芯的熔模精铸路线

Fig. 1 Fused precision casting route with preset cores

作者简介:

高沛莹(1999-), 男, 硕士生, 研究方向为铝合金铸造及工艺研究。E-mail: GPY15617130108@163.com

中图分类号: TG146.2;
TG249.5

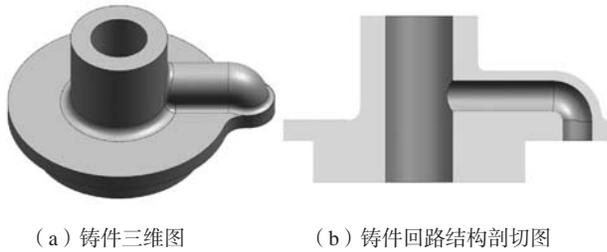
文献标识码: B
文章编号: 1001-4977(2024)
05-0637-07

收稿日期:

2023-03-31 收到初稿,
2023-12-21 收到修订稿。

1 铸件结构与技术要求

某泵体附件如图2a所示, 材料为ZL114A合金, 铸件最大外形尺寸为 $\Phi 132$ mm \times 66.5 mm, 其中 $\Phi 28$ mm的圆柱管道与 $\Phi 12$ mm的“L”状管道相交构成“丁”字形的铸件内腔, 属于典型的回路件(图2b)。铸件管道壁较薄为4 mm, 较难保证管道质量, 因此采用石膏型熔模铸造成形。在石膏型铸造中, 类似回路结构在制蜡模时将



(a) 铸件三维图

(b) 铸件回路结构剖切图

图2 铸件图

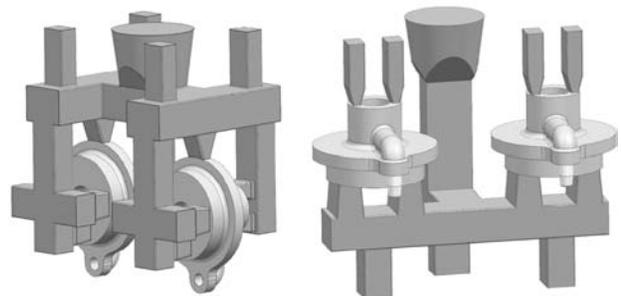
Fig. 2 Casting drawing

存在无法抽芯的问题。铸件管道内腔需一次成形，尺寸精度要满足HB 6103-2004 CT6的等级标准，气密性依据HB 963-2005 II类工作条件验收；铸件外形尺寸同样要满足CT6级的规定，其中上、下端面为装配加工面，不允许有任何缺陷。

2 铸造工艺方案

预置型芯的熔模精铸路线如图1所示，方案一采用预置可溶型芯精铸工艺，方案二采用预置石膏型芯精铸工艺。

方案一铸造工艺如图3a所示，考虑到对回路的灌浆与排气，因此将铸件立放；方案二铸造工艺则无相应限制，浇注系统设计主要更利于控制铸件熔炼质量，因此方案二采用图3b所示底注式浇注工艺。图4给出了两铸造工艺的自由液面演变结果，由图4a-b可见，侧注与顶注联合式工艺在充型3.1 s、4.6 s时，合金液交



(a) 侧注与顶注联合式

(b) 底注式

图3 铸造工艺方案

Fig. 3 Casting process solutions

汇使液面氧化膜与夹杂发生折叠，增加了铸件产生缩松的倾向；而底注式工艺液流充型平稳，液面氧化膜与夹杂未发生折叠，并在充型结束时上浮至冒口，因此底注式可保障铸件质量（图4d-f）。

3 试验材料与方法

3.1 回路件试制方法

可溶型芯材料主要由质量分数为80%的脲素、20%的碳酸氢钠组成，具体成分可参考文献[1]，通过将指定配比的脲素与碳酸氢钠混合均匀后升温至130 ℃，呈熔融态浇注进预热温度为60 ℃的铝合金芯盒中，待凝固冷却后开模来获得可溶型芯（图5a）。自制石膏型芯组成与含量见表1，按照各成分分配比将玻璃纤维、 α 半水石膏、莫来石粉均匀混合后加入水中，同时添加

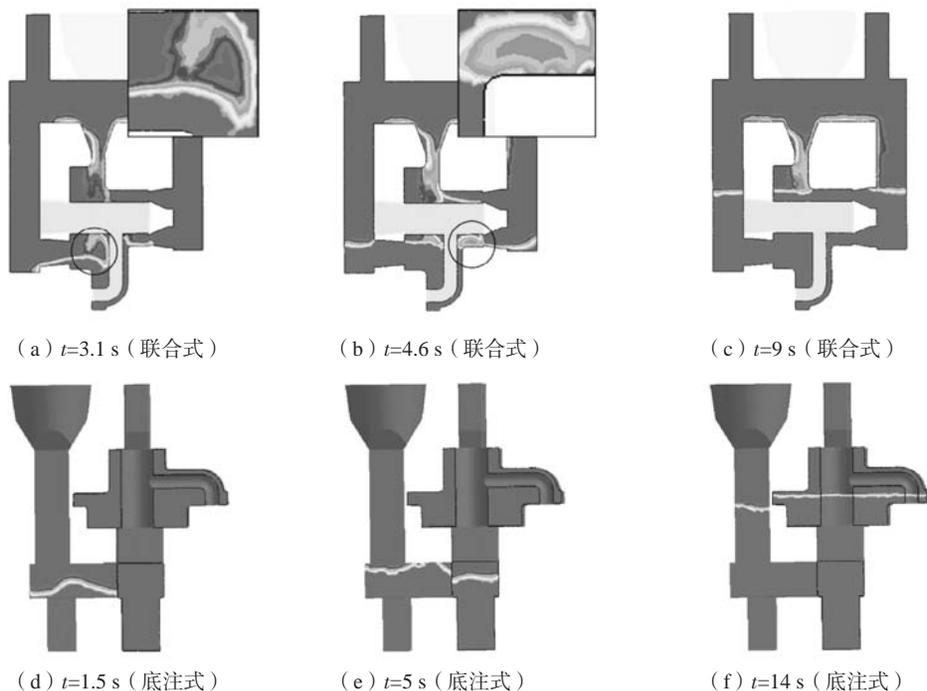
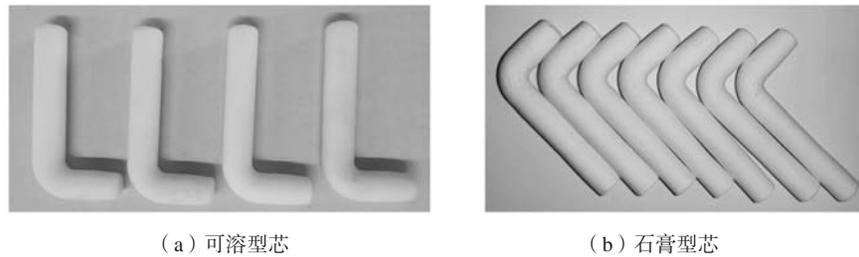
(a) $t=3.1$ s (联合式)(b) $t=4.6$ s (联合式)(c) $t=9$ s (联合式)(d) $t=1.5$ s (底注式)(e) $t=5$ s (底注式)(f) $t=14$ s (底注式)

图4 铸造工艺自由液面演变模拟结果

Fig. 4 Simulation results of the evolution of the free liquid level of the casting process



(a) 可溶型芯

(b) 石膏型芯

图5 预置型芯

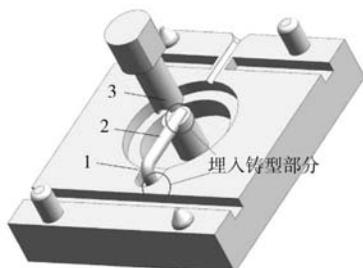
Fig. 5 Preset cores

表1 自制石膏型芯材料与含量
Table 1 Self-made plaster core material and content

α 半水石膏/%	电熔莫来石/%	玻璃纤维/%	水/%	消泡剂/%
40	60	0.3	32.5	0.4~0.5
(占固总量)			(占固总量)	

消泡剂进行二次搅拌（600 r/min，持续2 min），后将混合物浆料浇注进硅胶芯盒，并敲击芯盒除气，待浆料胶凝硬化后即可取芯（图5b）。石膏型芯经24 h室温干燥后即可使用（预置在压型中成形熔模），在石膏型精铸过程中仅一次焙烧。

将制备的预置型芯以图6方式（型芯芯头埋入压型）固定在压型中成形熔模，压型开模时抽出合金活



1. 压型基体 2. 预置型芯 3. 合金活动芯

图6 预置型芯固定方式

Fig. 6 Preset core fixing method

动芯，即可将带芯熔模拔出；之后组焊蜡模、浇注系统与冒口，组焊结果如图7所示。石膏铸型由商用铸造粉混合料浇灌模组，经阶梯形缓慢升温法^[4-5]脱蜡焙烧所得。浇注时，石膏铸型的预热温度为230 ℃，ZL114A的浇注温度为740 ℃ ± 5 ℃，合金液在-0.06 MPa的真空罐内浇注充型，在0.7 MPa的压力条件下凝固，保压时间20 min，冷却后即可开箱。

3.2 性能测试

以预置石膏型芯成形方法制作尺寸为 $\Phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的商用、自制石膏型芯圆柱形抗压试样，其中商用石膏型芯由质量比100:30的商用铸造粉与水组成。试样在室温通风干燥24 h后用电子万能试验机测得湿型强度，脱蜡焙烧后测得干型强度。采用游标卡尺测得焙烧前后试样径向与轴向的线变化，每个方向测得5个部位去除最大值和最小值，取平均值，最后将径向与轴向线变化的平均值作为试样总线变量，总线变量与焙烧前尺寸之比即为线收缩率^[7]。采用场发射扫描电镜观察焙烧试样断口形貌。

为了分析预置型芯对铸件质量的影响，分别对试制的回路件进行金相组织观察与力学性能测试。在管道薄壁与厚壁的中心位置截取金相试样，经磨光后用体积分数0.5%的HF进行腐蚀，采用GX51金相显微镜对其进行微观组织观察。采用数显布氏硬度计对回路



(a) 方案一模组



(b) 方案二模组

图7 蜡模组件

Fig. 7 Pattern assembly

件管道进行硬度测试，球压头选用 $\Phi 2.5$ mm，载荷为612.9 N，保压30 s，每一回路件沿管道薄壁与管道厚壁分别测量7个点，去除最大值和最小值后，取平均值。每一种方案试制的回路件在底座处截取出2个拉伸试样，在万能试验机上以2 mm/min的速度进行拉伸试验。

4 结果与讨论

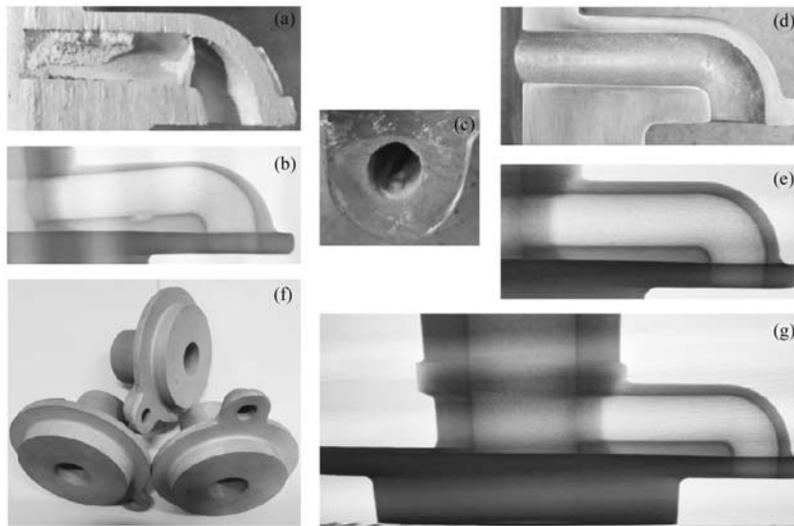
4.1 回路件试制结果

图8为两种精铸方案的生产试制结果，方案一预置可溶型芯采用联合式工艺总共浇注8件，3件回路堵塞（图8a）、1件回路壁厚不均匀（图8b）、2件“L”形回路内壁存在铸瘤缺陷（图8c），其中有4件厚大部位存在缩松缺陷。方案二预置自制石膏型芯采用底注式工艺总共浇注10件，9件回路完好（图8d-e），厚大部位未见明显缩松缺陷（图8g），并且经过检验后，铸

件的回路结构尺寸与内部质量满足技术要求，1件存在其他问题。

4.2 石膏型芯性能测试结果

图9给出了莫来石含量对自制石膏型芯湿型干型强度、线收缩率的影响趋势，由图9可见在莫来石含量为45%~65%的范围内，随着莫来石含量的提高，自制石膏型芯湿型干型强度和线收缩率逐渐降低。石膏型芯强度的建立主要来源于石膏晶粒三维搭接的网状结构，其次来源于填料粒子间的物理吸附作用^[9-10]。随着填料含量的减少，半水石膏含量越多，石膏结晶网对填料的包覆越完整充分，石膏型芯的强度就越高；同样，焙烧后石膏型芯尺寸的变化源自二水石膏相变为硬石膏时产生的体积收缩，半水石膏含量的增多会增加石膏型芯的尺寸收缩。因此在未添加增强剂与降收缩剂的条件下，石膏型芯高强度与低线收缩率相悖。



(a) 堵塞；(b) 壁厚不均匀；(c) 铸瘤；(d-e) 回路剖切与X射线探伤；(f) 合格件；(g) 合格件X射线探伤

图8 方案一与方案二试制结果

Fig. 8 Scheme 1 and scheme 2 experimental results

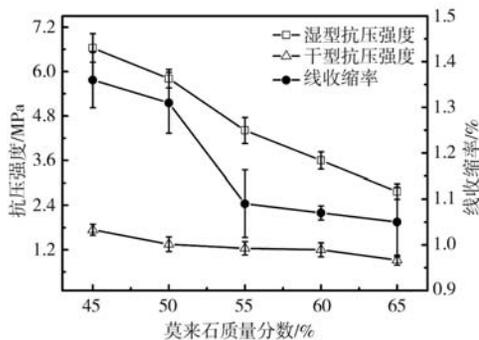


图9 莫来石含量对自制石膏型芯强度、线收缩率的影响

Fig. 9 Effect of mullite content on the strength and linear shrinkage of self-made gypsum cores

通过生产实践，为保证预置石膏型芯在铸造过程中不发生偏移、断裂，其在成形熔模时的湿型强度应大于射蜡机注蜡压力3.2 MPa，在搬运转转移焙烧后的铸型与充型金属液时的干型强度应大于1.0 MPa；为保证尺寸精度，在满足强度要求的同时，预置石膏型芯线收缩率变化要小于回路件管道尺寸CT6级要求（ $12 \text{ mm} \pm 0.27 \text{ mm}$ ）。因此莫来石加入量为60%。

表2给出了自制石膏型芯与商用石膏型芯的性能测试结果。自制石膏型芯的强度、线收缩率皆大于商用石膏型芯。图10给出了焙烧后商用石膏型芯与自制石膏型芯的断口形貌，可以看出，在自制石膏型芯中呈串珠状的硬石膏结晶网与莫来石填料紧密嵌合，每一

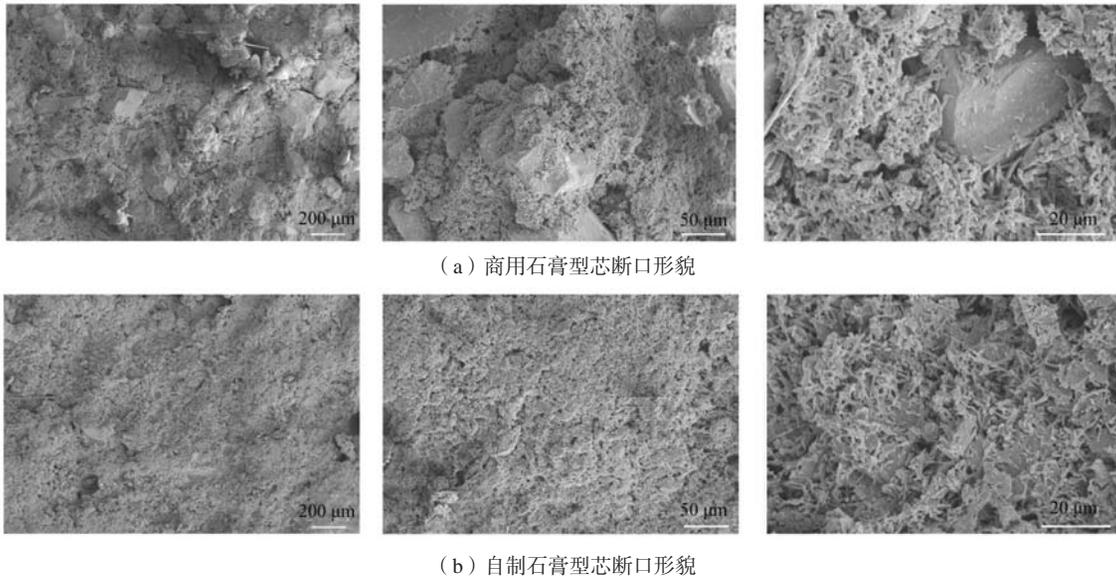


图10 石膏型芯断口形貌
Fig. 10 Fracture morphology of gypsum core

表2 自制石膏型芯与商用石膏型芯性能比较
Table 2 Properties of self-made plaster cores compared with commercial plaster cores

石膏型芯类型	湿型强度/MPa	干型强度/MPa	线收缩率/%
商用石膏型芯	1.25	0.59	0.76
自制石膏型芯	3.6	1.2	1.07

个莫来石填料都被硬石膏结晶网所包裹。而在商用石膏型芯中，大粒径的填料暴露在外，并且填料与填料的边界、硬石膏结晶网与填料的边界存在较多较大的孔隙。通过对比发现，自制石膏型芯的断口结构比商

用石膏型芯紧实致密。

4.3 回路件金相组织与力学性能测试结果

图11为两种精铸工艺浇注回路件管道壁的金相组织。图中可见，组织中浅色基体为 α -Al，在铝基体的边界分布着黑色的共晶Si；两精铸工艺浇注出的回路件管道壁组织并无明显差异，所不同的是预置可溶型芯的联合式工艺浇注的回路件管道厚壁出现了缩松（图11d-e）。缩松的出现与图4联合式浇注工艺自由液面演变的模拟结果相吻合，充型3.1 s时，在管道厚壁中心位置自由液面发生折叠导致了缩松的产生^[8]。

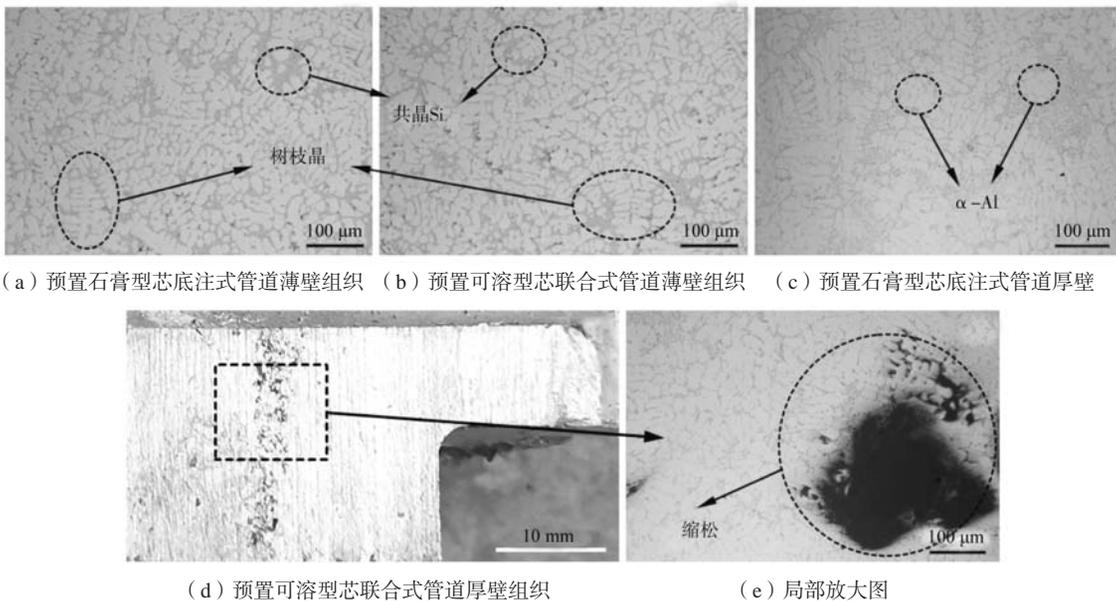


图11 回路件管道壁金相组织
Fig. 11 Pipeline wall metallographic organization of circuit parts

图12为两种精铸工艺试制的回路件力学性能测试结果,其中图12a为回路件管道壁硬度测试结果,图12b为回路件底座部位拉伸性能测试结果。两精铸工艺浇注的回路件管道薄壁硬度分别为HV 77.5、HV 76.2,管道厚壁硬度分别为HV 48.0、HV 56.6(图12a)。预置可溶型芯与预置石膏型芯对管道薄壁硬度的影响差别不大。预置可溶型芯的联合式工艺浇注的回路件在

管道厚壁分布着缩松缺陷,因此其硬度低于底注式浇注工艺。两精铸路线所浇注回路件底座部位的平均抗拉强度分别为138.5 MPa、158.5 MPa,平均断后伸长率分别为4.02%、4.81%(图12b),经对比发现预置石膏型芯的底注式工艺浇注出的回路件底座部位拉伸性能更优。综上,与预置可溶型芯工艺相比,预置石膏型芯工艺浇注出的回路件质量较优。

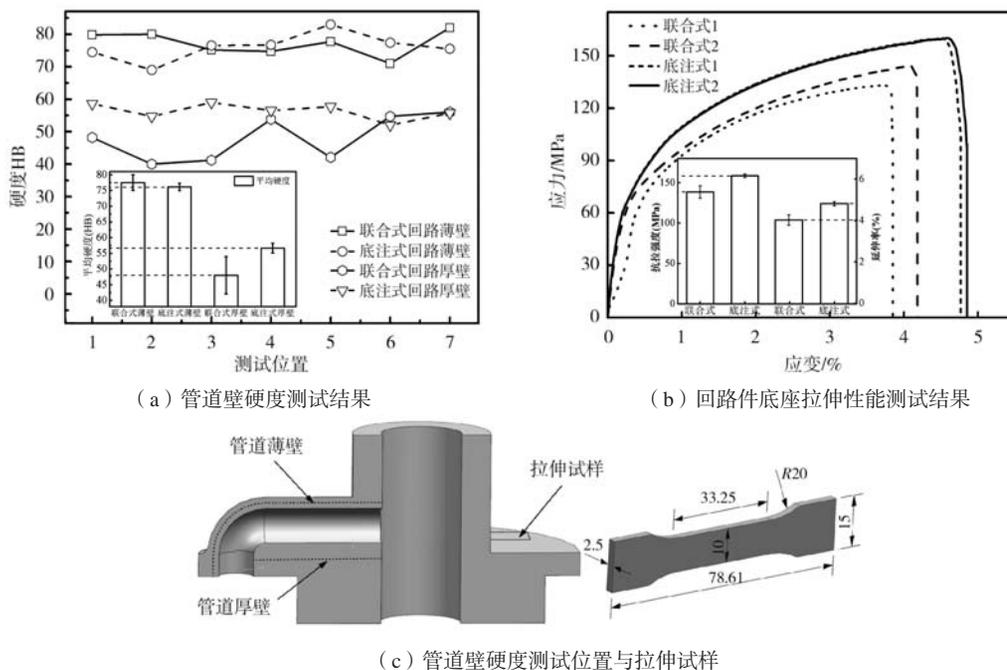


图12 两种精铸工艺试制的回路件力学性能测试结果

Fig. 12 Mechanical properties test results of circuit parts made by two investment casting process

4.4 结果分析与讨论

分析对比两方案试制过程,认为铸瘤存在的原因如下:商用铸造粉浆料浇灌空腔熔模过程中,制备或浇灌混合浆料产生的气泡容易在回路内聚集^[1, 4],很难逸出,蜡基熔模无退让性,因此气泡在铸造粉制石膏型芯的相应位置表现为凹坑,凹坑在合金液真空浇注增压凝固过程中被充型就形成了铸瘤。针对方案一缺陷原因,方案二通过提前将石膏型芯镶嵌在熔模中的方法避免了回路中铸瘤的出现,同时方案二为消除自制石膏芯成形过程中的气泡,通过在混合料中加入消泡剂、选择石膏混合料流动性好的水固比来保障。

由表2可知,自制石膏型芯的强度比商用石膏型芯的要高很多,这说明方案一中,由于商用石膏型芯湿型干型强度低,在脱蜡阶段,液蜡膨胀挤压型芯,在焙烧后石膏铸型的搬运与浇注环节,悬空的型芯受到振动与压弯,很容易导致石膏型芯偏移甚至断裂^[1, 6, 10],从而造成部分铸件回路堵塞(图8a)、回路壁厚不均匀(图8b)。而方案二中,石膏型芯在注蜡与脱蜡阶

段的湿型强度均较高,因此,很难出现上述问题。此外,自制石膏型芯干型强度也较高,在搬运石膏铸型与铝合金液充型凝固过程中耐冲击,不易发生断裂、偏移。自制石膏型芯线收缩率较大,但其收缩变化满足回路管道的公差要求,并且由于回路尺寸小,石膏型芯的收缩变化对其在石膏铸型中的定位影响较小。

另外,由图10分析可看出,自制石膏型芯的强度高于商用石膏型芯的原因在于自制石膏型芯中莫来石粒径较小,能较好的分散在硬石膏的骨架搭接结构中,进而硬石膏结晶网对其包覆的更完整充分;并且相对于商用石膏型芯中大粒径的填料,粒径小的莫来石吸附与保持水的能力更强,在石膏混合料凝结过程中向石膏结晶网中排出的水分就少,焙烧后水分蒸发留下的孔隙也随之减少。因此填料粒度对石膏型芯强度的提高有重要影响。

5 结论

(1) 采用预置石膏型芯,通过提高石膏型芯强

度、预先将石膏型芯镶嵌在熔模中，成功制出了合格的铝合金回路件。

(2) 自制石膏型芯湿型强度为3.6 MPa、干型强度为1.2 MPa、线收缩率为1.07%，可满足回路件成形的

的工艺与技术要求。

(3) 对试制的回路件进行金相组织观察与力学性能测试，综合考虑拉伸性能、硬度、显微组织，预置石膏型芯的底注式工艺浇注出的回路件质量较优。

参考文献:

- [1] 罗启全. 铝合金石膏型精密铸造 [M]. 广州: 广东科技出版社, 2005.
- [2] 孙昌建, 舒大禹, 王元庆, 等. 大型复杂薄壁铝合金铸件真空增压铸造特性研究 [J]. 铸造, 2008 (5): 442-445.
- [3] 杨林杰, 周志杰, 王狂飞, 等. 铝合金复杂管路的石膏型预理铸造工艺 [J]. 铸造, 2022, 71 (7): 906-910.
- [4] 许广涛, 周志杰, 王狂飞, 等. 某大型铝合金件石膏型精铸与尺寸控制 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (9): 117-119.
- [5] 王狂飞, 李早, 周志杰, 等. 铝合金石膏型精铸呛火预防措施 [J]. 铸造, 2017, 66 (8): 831-834.
- [6] 张永红, 郑忠俊, 李显东, 等. 飞机进气风罩的整体制造新工艺 [J]. 航空制造技术, 2004 (3): 65-67.
- [7] 程鲁, 董选普, 马戎, 等. 熔模铸造复杂薄壁镁合金易溃散性石膏型研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2011, 31 (8): 736-739.
- [8] 王狂飞, 乔江涛, 南红艳, 等. 双膜缺陷在ZL101A合金石膏型精铸缩松形成中作用研究 [J]. 铸造, 2018, 67 (5): 385-388.
- [9] 高以熹, 张湛, 吴建仁. 石膏型熔模精铸工艺及理论 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1992.
- [10] 周英伟, 尹绍奎, 姜延春, 等. 填料粒度对熔模铸造石膏型性能的影响 [J]. 铸造, 2021, 70 (11): 1319-1324.

Exploration of Investment Cast ZL114A Aluminum Alloy Casting by Preset Gypsum Cores

GAO Pei-ying¹, WANG Kuang-fei¹, LIU Yang², YANG Lin-jie¹, SUN Shang-song², LI Wei²

(1. School of Materials Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China; 2. Henan Zhengxu Technology Co., Ltd., Jiaozuo 454000, Henan, China)

Abstract:

The soluble core is often used for aluminum alloy precision casting with tubular circuit for the difficulty in core pulling during the wax pattern making. However, the precision casting is prone to defects such as scabs and runner blockage. Therefore, this paper improves the method by using a preset gypsum core and compares the casting effects of the two methods. The results show that the preset plaster core is indeed feasible.

Key words:

aluminum alloy; plaster mold; tubular circuit; preset plaster core
