

树脂砂低压铸造工艺研究与应用

商 毅, 郭 蓓

(西安航天发动机厂, 陕西 西安 710100)

摘 要: 研究了树脂砂低压铸造工艺理论与原理, 结合工艺试验得到了铝合金 ZL104 涡轮泵出口管树脂砂低压铸造工艺规范。采用该工艺规范制造的铝合金 ZL104 涡轮泵出口管已用于 CZ-5 和 CZ-7 运载火箭液氧煤油液体火箭发动机之中, CZ-5 和 CZ-7 运载火箭已通过了飞行考核, 液氧煤油液体火箭发动机工作正常。由此表明: 铝合金 ZL104 涡轮泵出口管树脂砂低压铸造工艺是合理、正确和有效的。

关键词: 铸造工艺; 铝合金; 树脂砂; 低压铸造

中图分类号: V261.3-34 文献标识码: A 文章编号: 1672-9374 (2017) 04-0063-07

Research and application of low-pressure casting process of resin sand

SHANG Yi, GUO Bei

(Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100, China)

Abstract: The low-pressure casting process specifications of resin sand for outlet pipe mounted on ZL104 Al alloy turbopump were obtained based on the study of the theory and principle for low-pressure casting technology of resin sand as well as relevant process tests. ZL104 Al alloy turbopump outlet pipe manufactured with the above specifications has been used in the LOX/kerosene liquid rocket engine of CZ-5 and CZ-7 launch vehicles. CZ-5 and CZ-7 launch vehicles have passed flight tests, and their LOX/kerosene liquid rocket engines operates normally, which indicates that the resin sand low-pressure casting technology for the outlet pipe mounted on ZL104 Al alloy turbopump is reasonable, correct and effective.

Keywords: casting process; Al alloy; resin sand; low-pressure casting

0 引言

铸造工艺属于金属热成形工艺, 其中包括精密铸造和砂型铸造, 砂型铸造分为树脂砂铸造和

粘土砂铸造, 树脂自硬砂即树脂砂铸造可实现铸件组织致密、余量少、无余量加工的精密铸造成型, 铸造成型件的表面粗糙度小, 适宜铸造铝合金涡轮泵壳体及其出口管等部件。铝合金密度

收稿日期: 2016-01-13; 修回日期: 2017-06-26

作者简介: 商毅 (1982—), 男, 工程师, 研究领域为铸造技术

低,比模量和比强度值高,导热性和导电性能好,抗腐蚀能力强,机械加工和铸造工艺性好,广泛用于航空航天和现代交通运输等领域,是轻量化和高速化部件的重要材料之一。薄壁铝合金涡轮泵出口管铸件是液体火箭发动机的重要部件之一,它是液体火箭发动机涡轮泵的出口装置,其出口流道为螺旋形扩散式结构,机械加工工艺很难完成其复杂型面的加工,必须依靠树脂砂低压铸造工艺来完成薄壁铝合金涡轮泵出口管的制造,树脂砂低压铸造工艺技术可以确保薄壁铝合金涡轮泵出口管的形状、尺寸、表面粗糙度等满足设计技术要求。

1 铝合金涡轮泵出口管铸件设计要求

薄壁铝合金涡轮泵出口管铸件结构如图1所示,设计要求见表1。涡轮泵出口管铸件材料为ZL104铝合金材料,采用X光射线照相方法和荧光法检查涡轮泵出口管铸件质量,要求出口管铸

件内部不允许有疏松、缩孔及夹杂等缺陷,铸件表面不允许有线状缺陷和积聚状缺陷,不允许用补焊方法进行补修,涡轮泵出口管铸件轮廓尺寸为 $(310 \times 240 \times 175)$ mm,涡轮泵出口管铸件大部分部位的壁厚为9 mm,最薄处的壁厚为3 mm,最厚处的壁厚为16 mm,即涡轮泵出口管铸件为变壁厚的出口管。

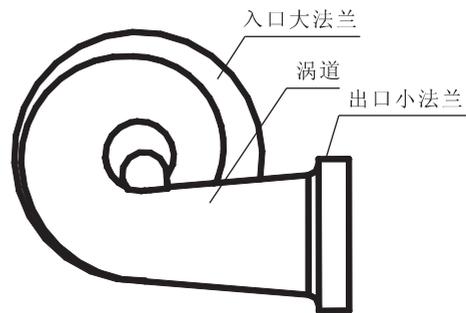


图1 薄壁铝合金 ZL104 涡轮泵出口管铸件结构示意图

Fig. 1 Structure of thin-wall casting outlet pipe for ZL104 Al alloy turbopump

表1 薄壁铝合金 ZL104 涡轮泵出口管铸件设计要求

Tab. 1 Design requirements of thin-wall casting outlet pipe for ZL104 Al alloy turbopump	
项 目	设计要求
材料	ZL104
铸造尺寸公差	GB/T9438-1999 CT10
表面粗糙度	铸件内外表面粗糙度 Ra12.5,局部允许 Ra25
X光检查要求	铸件内部不允许有疏松、缩孔、夹杂等缺陷,不允许用补焊方法进行补修
荧光法检查要求	铸件表面不允许有线状缺陷和积聚状缺陷,在面积单元 (25×25) mm 范围内,单个聚集状缺陷最大缺陷面积 $<(10 \times 10)$ mm,且相邻缺陷之间间隔距离 ≥ 5 mm
轮廓尺寸	$(310 \times 240 \times 175)$ mm
壁厚	出口管铸件大部分部位的壁厚为9 mm,允许局部壁厚 ≥ 6.5 mm
液/气压强度试验	液压强度试验压力为2 MPa,保压5 min,不渗漏为合格 气密试验压力0.5 MPa,保压5 min,不渗气为合格

2 树脂砂低压铸造工艺原理

2.1 树脂砂低压铸造原理

树脂砂低压铸造工艺是将树脂砂铸造与低压

铸造工艺相结合的一种工艺方法,该方法代替了传统的粘土砂重力铸造法。砂型铸造所使用的铸型是用型砂制成的,根据使用的粘结剂不同可分为2类:潮模砂铸造和树脂砂铸造。树脂砂型

(芯) 通常是由原砂、合成树脂粘结剂和固化剂等按一定比例混制而成, 混好的型 (芯) 砂经过紧实后, 在一定的工艺条件下固化成铸型和砂芯。常用的树脂砂型为自硬砂型。树脂砂铸造是在混砂机里先加入砂子, 再加树脂到微微有些湿润, 最后加固化剂, 固化剂加得越多凝固越快。具体比例要根据实际工艺情况而定, 温度和湿度对砂型固化均有影响。低压铸造是一种介于重力铸造和压力铸造之间的铸造工艺方法, 属于反重力铸造工艺范畴, 它是指液态金属在可控压力和可控液态金属充型速度双重要素的作用下, 合金液 (即液态金属) 自下而上平稳地充填型腔, 并在一定压力作用下结晶、凝固、成形的一种铸造工艺方法, 由于所加的压力较低 (22~70 kPa), 所以称之为低压铸造。在合金液充型过程中, 由于充型压力和充型速度可调、可控, 所以合金液充型平稳, 因而减少或避免了合金液在充型过程中出现冲击、飞溅、翻腾等现象, 从而减少了氧化夹渣等铸件缺陷的形成, 提高了铸件质量。低压铸造对铸模的适应性强, 不仅可以采用砂型铸模, 还可以采用石墨型、壳型、熔模精铸壳型、陶瓷型、金属型以及半金属型铸模等。低压铸造可铸合金范围广, 不仅可以铸造有色金属锌、铝、镁等, 还可以铸造黑色金属球墨铸铁、钢等。

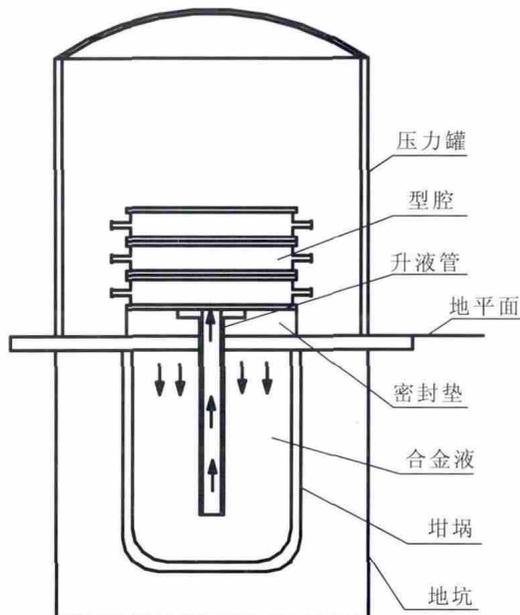


图 2 树脂砂低压铸造原理简图

Fig. 2 Low-pressure casting principle of resin sand

图 2 是低压铸造的基本原理示意简图, 在装有合金液的密封坩埚内, 通入干燥的压缩空气, 使其作用在保持一定温度的合金液面上, 随后坩埚和型腔之间产生压力差, 在该压力差的作用下, 合金液沿升液管经浇道自下而上充满型腔, 待型腔充满后, 增大坩埚内气压, 并保压至铸件完全凝固成形, 然后卸除坩埚内压力, 使升液管和浇道中未凝固的合金液回流到坩埚内, 即可完成一个低压铸造过程, 冷却后脱模即可获得所需铸件。

2.2 铸造铝合金 ZL104 材料

铸造铝合金按照所含基本合金元素的不同分为铝硅系、铝铜系、铝镁系及铝锌系铸造铝合金。以 Al-Si 为基的铝合金是现代工业应用最广泛的一种铸造铝合金, 工业上称之为“硅铝明”, 其优点是: 具有优良的铸造性, 能制造大型铸件或者形状复杂的薄壁铸件而不会产生裂缝; 抗腐蚀性能好; 密度比其他铸造铝合金小; 力学性能较好。这类合金分为普通硅铝明和特殊硅铝明, 普通硅铝明是由硅-铝 2 种主要元素组成的 Al-Si 系二元合金, 其典型代表为工业上所广泛应用的 ZL102 合金, 这种合金中的铝和硅不形成任何化合物, 仅形成有限固溶体, 其金相组织是由粗大的针状硅构成的共晶组织和初晶硅所组成, 由于硅的脆性很大, 所以这种合金的铸造性能虽好, 但力学性能很差, 必须经过变质处理才有实用价值; 同时由于硅在固态铝中的溶解度非常小, 所以不能进行热处理强化, 一般仅用于铸造负荷不大、形状复杂、耐冲击和耐腐蚀的机械结构零件。为了进一步提高普通硅铝明的力学性能, 通常再向合金中加入 Cu, Mg 等元素, 这种合金称为特殊硅铝明, 如 ZL101, ZL104, ZL105, ZL106, ZL107, ZL108, ZL109 及 ZL111 等, 这类合金除个别需要变质处理外, 大部分可不经变质处理, 同时因能形成 CuAl_2 , Mg_2Si 等化合物, 可以热处理强化, 这样可使合金不但有较好的耐腐蚀性、耐热性和良好的铸造性能, 而且还有相当高的强度, 从而大大扩大了硅铝明合金在工业上的应用。本论文所采用的铸造铝合金即为特殊硅铝明 ZL104。

2.3 低压铸造浇注工艺原理

低压铸造浇注工艺的设计思想是：保证合金液平稳充型，在避免冷隔和浇不足缺陷的条件下采用较低的充型速度和较低的浇注温度以完成最佳的铸造成型。低压铸造浇注工艺过程原理简图见图3，低压铸造浇注工艺过程主要包括升液、充型、增压结晶、保压凝固及卸压冷却等阶段，各阶段的浇注工艺参数直接影响铸件质量，为了获得最佳铸造成型铸件，按照下述原则确定各阶段的浇注工艺参数。

2.3.1 升液阶段浇注工艺参数理论计算

升液阶段是将一定压力的干燥空气通入坩埚内，使金属液沿着升液管平稳上升至铸型的浇道处，该过程即为升液阶段。升液压力^[6]

$$p_1 = h_1 \gamma \mu \times 10^{-5} \quad (1)$$

式中： h_1 为铸型的浇道处至密封罐内坩埚里金属液面之间的距离，mm； γ 为铝合金金属液密度， $\gamma = 2.4 \times 10^3$ ； μ 为阻力系数，通常取 $\mu = 1.0 \sim 1.5$ 。

升液时间

$$t_1 = h_1 / v_1 \quad (2)$$

式中 v_1 为升液速度，mm/s。

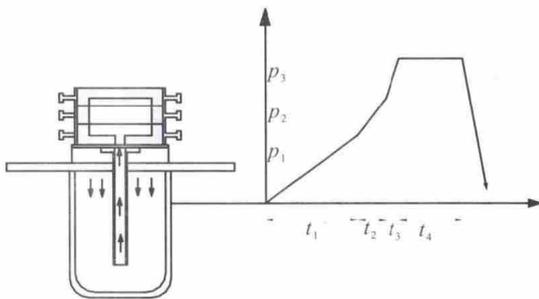


图3 低压铸造浇注工艺过程原理简图

Fig. 3 Principle diagram for pouring process of low-pressure casting

2.3.2 充型阶段浇注工艺参数理论计算

充型阶段是金属液由浇道进入型腔直至充满铸型，充型速度一般根据铸件壁厚来确定，充型压力

$$p_2 = h_2 \gamma \mu \times 10^{-5} \quad (3)$$

式中 h_2 为浇注后密封罐坩埚内金属液面至铸型最高处的高度，mm。

充型时间

$$t_2 = (h_3 - h_1) / v_2 \quad (4)$$

式中： h_3 为浇口出口处距离铸型顶部之间的高度，mm； v_2 为充型速度，mm/s。

2.3.3 增压、凝固阶段浇注工艺参数选取准则

增压、凝固阶段是金属液充满型腔后，立即进行增压，使金属液在高于升液、充型的压力下结晶凝固，合金液在结晶压力的作用下经升液管、浇道向铸件不断进行补缩，从而防止了铸件出现缩孔和缩松等铸造缺陷，有利于铸件组织致密，可提高铸件力学和机械性能。一般来说，结晶压力越大，补缩效果越好，不过增大结晶压力并不是对所有类型铸件的补缩均是有效的，比如砂型低压铸造结晶压力过大会产生铸件表面粘砂和胀箱等缺陷，还会降低铸造件的质量、铸造件表面的光洁度以及铸造件尺寸精度，另外，结晶压力过大还会造成跑火现象，使得铸造生产过程产生不安全的隐患。结晶压力一般是根据铸型种类、铸件形状与结构、铸造设备的水平与能力等因素来进行选择的。

根据铸造设备的水平能力以及铸造工艺试验，选取结晶增压压力 $p_3 = 0.01$ MPa，结晶增压速度 $v_3 = 0.003$ MPa/s。

2.3.4 卸压、冷却阶段浇注工艺参数选取准则

卸压、冷却阶段是铸件凝固完毕，卸除坩埚中的压力，使升液管和浇道中尚未凝固的金属液回落至坩埚内，并冷却到一定时间，开型，落砂。

依据以上原则，通过4批次工艺试验，确定了涡轮泵出口管低压铸造工艺参数如下：

升液速度： $v_1 = 40$ mm/s；

充型速度： $v_2 = 40$ mm/s；

结壳时间： $t_3 = 3$ s；

结壳增压压力： $p_4 = 0.005$ MPa；

结壳增压速度： $v_4 = 0.003$ MPa/s；

结晶时间： $t_4 = 500$ s；

结晶增压压力： $p_3 = 0.01$ MPa；

结晶增压速度： $v_3 = 0.003$ MPa/s。

3 树脂砂低压铸造工艺

铝合金 ZL104 涡轮泵出口管树脂砂低压铸造

工艺流程如图 4 所示。

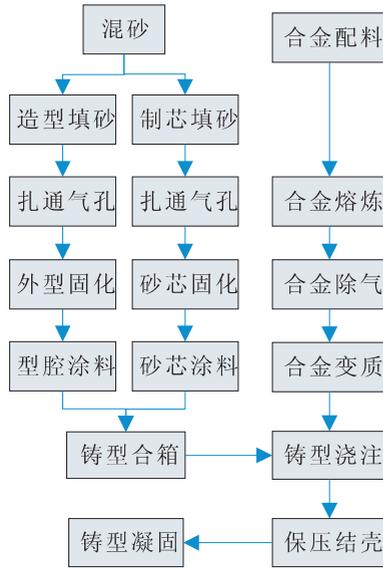


图 4 铝合金 ZL104 涡轮泵出口管树脂砂低压铸造工艺流程框图

Fig. 4 Flow chart of resin sand low-pressure casting technology of outlet pipe for ZL104 Al alloy turbopump

由图 4 可见，铝合金 ZL104 涡轮泵出口管树脂砂低压铸造工艺主要工序有：混砂、树脂自硬砂固化、铸型喷涂、铸型透气孔制作、制芯造型、熔炼、铸型浇注、保压结壳、凝固成形、卸压及冷却脱模等。在 5T/H 型连续式自动混砂机上，采用原砂：树脂=100：2，树脂组分（酚醛树脂）：树脂组分（聚异氰酸酯）=1：1 配方进行混砂，通过 PLC（可编程控制器）调整供应树脂的电机的转速，以调节树脂配比与各组分的加入量（组分与组分发生加成聚合反应生成固态氨基甲乙酯的催化剂为液态胺（ $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{NH}_2$ ）），混砂过程为机械连续自动方式，原砂通过叶片轴承传动进入混砂机小臂，在小臂入口处，树脂组分进入小臂开始混砂，约 3 s 后砂子随叶片搅动行至小臂中央，再加入树脂组分混合 2 s 后，由出砂口出砂。树脂砂固化，树脂加入量的多少是影响树脂砂固化速度快慢的最主要因素，树脂加入量越多，砂粒之间越容易形成粘结桥，粘结桥的厚度和接触面积也随之增加，型砂“8”字型试样横截面积计算的抗拉强度与树脂桥截面积计算的抗拉强度和断口中树脂

桥的实际面积占整个断口截面积的百分比成正比，由此可见，随着树脂砂配比中树脂量的增加，粘结桥的数量亦随之增多，粘结面积亦随之增大，则砂型强度亦就越高；在室温条件下，经过 27~30 min 后，树脂自硬砂则可建立起初始强度，固化 5 h，树脂自硬砂砂型强度 σ_b 值增加较快，砂型强度可达到终极强度值的 90%，固化 5~24 h，树脂自硬砂砂型强度 σ_b 值的增加则趋于平缓，最终达到 $\sigma_b = 2.0 \text{ MPa}$ ，树脂自硬砂的固化过程是各种原材料分子在加热和液态胺催化剂的作用下，初步聚合成具有二维空间的线性链状结构的初聚物分子，而后在在第二种固化剂（组分）的加入和作用下，促使树脂分子间的聚合反应继续进行并形成具有非常大分子量的、具有三维空间结构的不溶性的体形网状高分子聚合物，当三维结构聚合反应发生在砂子之间时，所形成的网状树脂结构就将砂粒彼此粘结起来，形成坚硬的骨架结构，这也就是通常所说的树脂产生固化反应而硬化了，当二维空间结构的线性聚合物分子与砂子混合时，在固化剂（组分）的作用下，树脂的聚合反应开始时较慢，继而反应加速直到反应完全，刚开始的聚合反应会被砂子的流动而打断，即阻碍聚合反应生成网状结构，反之，网状聚合物的形成也阻碍了砂子的流动性，最后树脂自硬砂在铸造模具中则形成了具有一定强度的、固化成型的型砂。铸型喷涂，低压铸造是在合金液加压状态下充型完成铸造的，合金液充型能力特别强，砂粒之间的间隙在铸件充型过程中会钻铝，使铸件表面粗糙，浇注系统切割清理困难，并影响铸件表面质量，为此，在铸型合箱前必须给铸型内壁刷涂料以保护铸件和浇注系统型腔表面，并让涂料材料分子填平型腔内表面砂粒间的间隙，铸造铸型涂料有水基和醇基 2 种，水基涂料需用烘箱烘烤以去除水分，水基涂料与自硬砂树脂不互溶，涂覆性差，醇基涂料与自硬砂树脂均为有机物，互溶性好，容易涂刷，涂刷后只要点火就可将乙醇烧除，操作简单，铝合金 ZL104 涡轮泵出口管树脂砂低压铸造选用常州 945 醇基涂料，涂刷工艺为：醇基涂料使用前充分搅拌，用涂-4 型粘度杯测量并控制醇

基涂料的流速,醇基涂料流速的要求值为 16~18 s 应流过 100 ml 常州945 醇基涂料;第一遍采用软质毛刷刷涂,点燃、干燥后修光;第二遍采用 SATA 型喷枪喷涂,喷枪移动速度保持在约 40 mm/s;检查涂层表面质量,涂层表面要求均匀光洁、无漏涂和凸起点等;采用常州 945 醇基涂料铸造铝合金 ZL104 涡轮泵出口管,铸件表面光亮平整,无起皮现象。铸型透气孔制作,铸型内壁涂覆醇基涂料后,铸型透气性降低,浇注时型腔中的气体不易逸出,为此,需制作铸型透气孔,铸型透气孔制作要求为:在 $\Phi 85 \times 60$ mm 的砂芯外壁随机分布 10- $\Phi 3$ mm 的排气孔,在铸型顶部 (60 \times 600) mm 的平面范围内随机分布 30- $\Phi 3$ mm 的排气孔,此时,铝合金 ZL104 涡轮泵出口管树脂砂低压铸造制芯造型完成,实践表明:采用该排气孔设计方案,铝合金 ZL104 涡轮泵出口管树脂砂低压铸造浇注过程正常,铸件表面状态良好。铝合金 ZL104 涡轮泵出口管树脂砂

低压铸造过程包括 4 个阶段:升液和充型阶段、保压结壳阶段、加压凝固阶段及保压凝固阶段,根据 (公式 1) 和 (公式 3) 可分别计算升液压力 p_1 和充型压力 p_2 , 计算结果为: $p_1 \approx 0.015$ MPa 和 $p_2 \approx 0.033$ MPa。通过工艺试验,可得到:升液速度 $v_1=40$ mm/s,充型速度 $v_2=40$ mm/s,结壳增压压力 $p_4=0.005$ MPa,结壳增压速度 $v_4=0.003$ MPa/s,结晶增压压力 $p_3=0.01$ MPa,结晶增压速度 $v_3=0.003$ MPa/s,低压浇注温度 $t=675 \pm 5$ $^{\circ}\text{C}$ 。

4 试验验证

采用上述铝合金 ZL10 涡轮泵 4 出口管树脂砂低压铸造工艺规范,按照图 4 铝合金 ZL104 涡轮泵出口管树脂砂低压铸造工艺流程对 5 炉 20 件铝合金 ZL104 涡轮泵出口管铸件进行了 X-ray、荧光和液/气压试验验证,铝合金 ZL104 涡轮泵出口管铸件液/气压试验系统原理如图 5 所示。

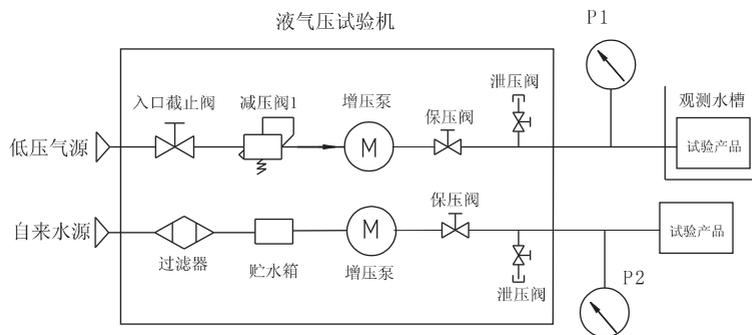


图 5 铝合金 ZL104 涡轮泵出口管铸件液/气压试验系统原理简图

Fig. 5 Principle of hydraulic/pneumatic testing system for casting outlet pipe for ZL104 Al alloy turbopump

试验表明:20 件铝合金 ZL104 涡轮泵出口管铸件经过 X-ray 检查,合格件为 16 件,合格率为 80%;X-ray 检查合格的 16 件铸件荧光渗透检查结果为全部合格,合格率为 100%;16 件铝合金 ZL104 涡轮泵出口管铸件经过机械精加工后进行了液压强度和气密试验,试验压力为 2 MPa,保压时间 5 min,未发生渗漏现象;气密试验,试验压力 0.5 MPa,保压时间 5 min,未发生渗气现象,16 件铝合金 ZL104 涡轮泵出口管铸件通过了液/气压试验。采用该工艺规范制造的

铝合金 ZL104 涡轮泵出口管已用于 CZ-5 和 CZ-7 运载火箭液氧煤油液体火箭发动机之中,CZ-5 和 CZ-7 运载火箭已通过了飞行考核,液氧煤油液体火箭发动机工作正常,由此表明:铝合金 ZL104 涡轮泵出口管树脂砂低压铸造工艺是合理、正确和有效的。

5 结论

本文通过研究树脂砂低压铸造工艺理论与原理,并结合铸造工艺试验,得出液氧煤油液体火箭

发动机涡轮泵铝合金 ZL104 涡轮泵出口管树脂砂低压铸造工艺规范, 即升液压力 $p_1 \approx 0.015 \text{ MPa}$, 充型压力 $p_2 \approx 0.033 \text{ MPa}$, 升液速度 $v_1=40 \text{ mm/s}$, 充型速度 $v_2=40 \text{ mm/s}$ 、结壳增压压力 $p_4=0.005 \text{ MPa}$, 结壳增压速度 $v_4=0.003 \text{ MPa/s}$, 结晶增压压力 $p_3=0.01 \text{ MPa}$, 结晶增压速度 $v_3=0.003 \text{ MPa/s}$ 及低压浇注温度 $T=675 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, 采用该工艺规范制造的铝合金 ZL104 涡轮泵出口管已用于 CZ-5 和 CZ-7 运载火箭液氧煤油液体火箭发动机之中, CZ-5 和 CZ-7 运载火箭已通过了飞行考核, 液氧煤油液体火箭发动机工作正常, 由此表明: 铝合金 ZL104 涡轮泵出口管树脂砂低压铸造工艺是合理、正确和有效的。

参考文献:

- [1] 吕振林, 周永欣, 徐春杰, 等. 铸造工艺及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [2] 白香爱. 自硬树脂砂的应用及最新发展[J]. 铸造设备研究, 2003 (1): 38-40.
- [3] 吴来发, 崔明胜, 刘伟. 树脂砂造型工艺技术要素控制[J]. 铸造技术, 2011, 32(9): 1287-1290.
- [4] 米国发, 浮红霞, 刘彦磊. 酚醛树脂砂性能极其影响因素的研究[J]. 制造技术研究, 2008 (2): 14-15.
- [5] 李弘英, 赵成志. 铸造工艺设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [6] 董秀琦. 低压及差压铸造理论与实践[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [7] 李梅娥, 邢建东, 杨根仓. 薄壁件充型过程的临界入口速度研究[J]. 铸造技术, 2002, 23(3): 180-183.
- [8] 郭忠民, 陈大胜. 薄壁复杂铝合金铸件低压铸造工艺实践[J]. 压铸, 2007, 28(7): 62-64.
- [9] 侯华, 徐宏, 程军. 低压铸造缩孔缩松判据预测技术[J]. 铸造技术, 2004, 25 (10): 769-771.

[1] 吕振林, 周永欣, 徐春杰, 等. 铸造工艺及应用[M]. 北京:

(编辑: 马 杰)

(上接第 62 页)

- [6] 王焮, 吴国平. 小波分析在遥感图像融合中的模型研究[J]. 中国图像图形网, 2004, 11(1): 67-70.
- [7] 郑永安, 陈玉春, 宋建社, 等. 基于提升机制小波变换的 SAR 与多光谱图像融合算法 [J]. 计算机工程, 2006, 32 (6): 195-197.
- [8] LI H, MANJUNATH B S, MITRA S K. Multisensor image fusion using the wavelet transform[J]. Graphical models and image processing, 1993, 57(3): 235-245.
- [9] JIANG X Y, ZHOU L W, GAO Z Y. Multispectral image fusion using wavelet transform [J]. Proceedings of SPIE, 1996, 2898: 35-42.
- [10] SANTOS M, PAJARES G. A new wavelets image fusion strategy [J]. Lecture notes in computer science 2652, 2003: 919-926.
- [11] CHIBANI Y, HOUACINE A, BARBIER C. Fusion of multispectral and radar images in the redundant wavelet domain [C]//Proceedings of the EUROPTO Conference on Image and Signal Processing for Remote Sensing. Barcelona, Spain: SPIE, 1998: 330-338.
- [12] 周伟, 周林, 张家祥. Matlab7.0 小波分析高级技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.
- [13] 王海晖, 彭嘉雄, 吴巍, 等. 多源遥感图像融合效果评价方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2003, 39(25): 33-37.
- [14] 曾梅兰, 金升平. 基于小波框架的多传感器图像融合[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(25): 59-61.
- [15] 杨俊, 赵忠明. 基于 Curvelet 变换的多聚焦图像融合方法[J]. 光电工程, 2007, 34(6): 67-70.

(编辑: 马 杰)