

离心精铸大型钛合金机匣铸造模拟及缩松缩孔缺陷分析

冉兴¹, 陈义斯², 高晓慧³, 龙兴权³, 付志鹏³, 何良菊⁴, 李培杰²

(1. 中航重机股份有限公司, 贵州贵阳 550005; 2. 清华大学机械工程系, 北京 100084;
3. 航空工业贵州安吉精密铸造有限责任公司, 贵州安顺 561000; 4. 清华大学航天航空学院, 北京 100084)

摘要: 燃气轮机中钛合金机匣具有尺寸大和结构复杂的特征, 一体化成形后铸件易出现缩松缩孔缺陷。本文结合铸件结构分析和离心精铸工艺特点, 设计了直浇道、横浇道和内浇道截面积比例为1:1.5:2.3的开放式底注螺旋型浇注系统。采用ProCAST软件对其进行充型凝固数值模拟, 研究了低离心转速下钛合金熔体的充型行为, 探讨了凝固过程铸件各区域固相率的演变规律。发现该机匣中缩松缩孔倾向于在厚大部位、流道面转接和底部浇口连接处, 主要原因是补缩不足、散热滞后和底部浇道高温影响。通过试铸铸件X光透视观察, 对比了铸造模拟和工程试铸中冶金缺陷的分布规律。基于此, 提出了一系列工艺改进措施对后续高质量的批量化生产具有重要的工程价值。

关键词: 钛合金; 机匣; 数值模拟; 离心浇注; 凝固缺陷

作者简介:

冉兴(1968-), 男, 博士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为熔模精密铸造。
电话: 0851-32208022,
E-mail: ranxing257@163.com; ranx@avic.com

中图分类号: TG249.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)03-0344-06

基金项目:

两机重大专项基础研究(J2019-VII-0002); 旋力超重成形大型复杂钛合金铸件整体精铸理论研究(ZJQT-2024-01)。

收稿日期:

2024-11-29 收到初稿,
2025-01-13 收到修订稿。

钛合金具有高比强度等优异特性, 广泛应用于航空、航天和舰船等各个领域^[1]。近二十年来, 随着钛合金部件轻量化和整体化的发展, 钛合金精铸件呈现出大型复杂薄壁化的趋势^[2]。离心铸造是一种通过旋转装置, 在浇注过程构建离心力场, 迫使金属液对铸型狭窄空腔快速充型, 并且补缩压力增加也有利于降低凝固缺陷^[3-4]。因此, 熔模精密铸造结合离心技术是大型复杂钛合金铸件生产的重要手段^[4-5]。

大量研究表明, 铸件中的气孔、缩松和缩孔等缺陷会严重影响铸件的力学性能、耐腐蚀性、疲劳寿命和可靠性^[6-8]。宁兆生等基于纯钛叶轮铸件结构特点, 设计了顶部浇注“一模四件”的浇注系统, 采用ProCAST有限元模拟软件预测铸件中缩松和缩孔位置, 改进工艺后有效消除了铸造缺陷^[9]。李峰等则通过ProCAST对某型环形钛合金铸件模拟, 在铸件中设置圆柱冒口补缩, 将中间安装边冒口高度增加10 mm, 斜度增大5°后, 将铸件的缩孔减小至热等静压可压合的尺寸^[10]。鲁素玲等采用水力学试验对ProCAST获得的流场和温度场进行验证, 发现增加浇注流量和转速可防止断流产生的缺陷^[11]。此外, 有研究者通过X光透视技术揭示了铸造缺陷在钛合金铸件中的结构和分布情况, 为提升铸件质量提供了优化方向^[12]。由此可见, 结合铸造模拟和铸件无损检测的工艺迭代策略在降本增效方面具有显著优势。燃气轮机钛合金机匣含有多道支板和复杂流道面, 是目前质量较大、高度较高的钛合金机匣铸件, 关于该类铸件的模拟和凝固缺陷研究尚未见系统报道。区别上述报道的中小型铸件, 轮廓尺寸和壁厚差异引起了工程中燃气轮机铸件完整成形困难、热节数量多和缺陷复杂的难题, 亟待建立实现铸件完整充填的浇注系统, 并透彻分析浇注过程的热节分布。

本文以某大型燃气轮机钛合金机匣铸件为研究对象, 采用Pro-CAST数值模拟仿真软件, 通过对铸件凝固过程的温度场计算, 分析铸件缩孔缺陷的形成机理和分布规律, 结合试制铸件冶金质量检测, 探讨浇注系统结构与缺陷的关联性, 为此类机匣结构产品的整体精铸成形工艺优化奠定理论基础。

1 研究对象及方法

1.1 铸件结构分析

本文选用的某大型钛合金机匣的结构示意图如图1所示,铸件最大外轮廓尺寸为 $\Phi 1\ 350\text{ mm} \times 1\ 000\text{ mm}$,最大壁厚为100 mm,最小壁厚10 mm。该机匣进气端

与出气端存在多处厚大环形法兰,在不同位置处设置有安装凸台,见图1(b)。铸件内外环存在多处支板结构,该机匣重量超过600 kg,是目前研制的高度较高、质量较大的熔模精密铸造钛合金机匣。

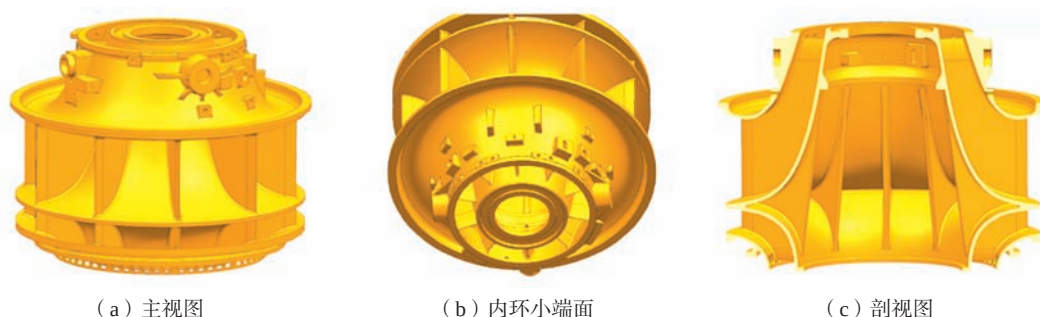


图1 燃气轮机机匣铸件结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of gas turbine casing casting

1.2 浇注系统结构与铸造模拟

设计铸件的浇注系统时,需根据铸件结构和成形工艺特性出发,考虑铸件充型和补缩方式,本文所构建的浇注系统模型示意图如图2(a)所示,紫色部分为铸件本体,黄色部分为浇注系统。机匣的两个端面是其在燃气轮机中的安装面,均属于铸件的重要成形面,但是相较于重力铸造,离心铸造具有一定特殊性。这是由于高速转动作用下构建的力场是距旋转轴沿半径分布的圆周面。由于机匣可近似视为回转体铸件,因此一般将铸件中心轴作为离心转轴,铸件呈竖直状态放置。此外,将铸件内环小段面开口向下,有利于制壳过程蜡料排出、挂壳与干燥。选用底注式螺旋形浇注系统,直浇道、横浇道和内浇道截面积比例为1:1.5:2.3;形成开放式浇注系统,加快金属液的充型速度^[3]。在厚大安装边和厚大凸台位置,以及铸件转接拐角等易出现孤立液相区的位置设置冒口。内浇道放置于铸件下端可同步起到平稳引入熔体和补缩

厚大安装边的作用。在铸件的外环上下放置支撑杆作为加强辐条提升蜡模和陶瓷型壳的刚度,抑制软化和收缩变形,同时也可视为横浇道,增大充型熔体的流量,强化对内环的填充。基于上述设计思路,构建如图2所示的浇注系统结构,促进大型复杂钛合金机匣铸件的顺序充型和凝固。

铸件采用UG软件建立三维数字模型,将模型导入Pro-CAST软件中,进行面网格划分,构建型壳20层,体网格划分检查,有限元体积网格数为10 392 648个。划分网格后的模型见图2(b)。铸件采用离心铸造方法成形,基于Pro-CAST中离心铸造模块进行铸造模拟仿真。合金材料为ZTC4,型壳材料为耐火陶瓷材料,铸件与型壳的换热系数为 $600\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。通用参数采用默认设置。结合经验和钛合金性能参数,设置型壳预热温度为 $550\text{ }^\circ\text{C}$,浇注温度为 $1\ 700\text{ }^\circ\text{C}$,模拟软件计算出金属液熔化量980 kg,浇注时离心转速为80 rpm。

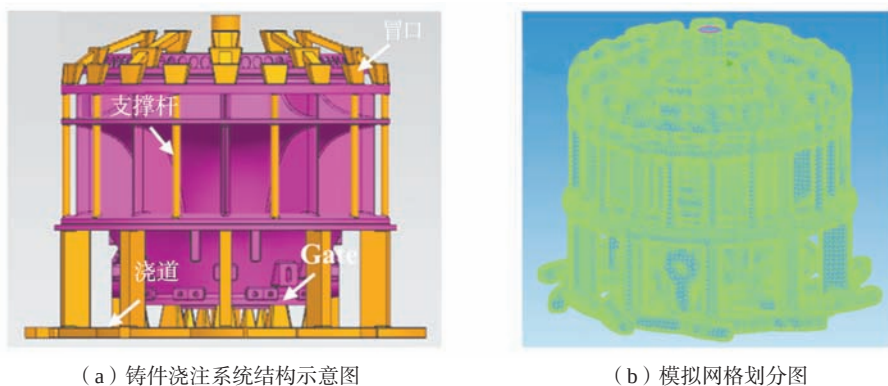


图2 铸件浇注系统结构示意图及模拟网格划分图

Fig. 2 Structure diagram of the casting pouring system and meshing diagram for simulation

2 结果与分析

2.1 铸件模拟的充型凝固行为

图3给出了离心铸造机匣铸件熔体充型行为模拟结果。如图3(a)所示,熔体浇注进入直浇道后迅速抵达末端,将熔体液流均匀、稳定地分配入螺旋形横浇道,并未出现熔体紊流或飞溅。这是由于直浇道和横浇道交接区域设置了缓冲区,缓和熔体质点运动方向的突变;另一方面,螺旋形横浇道的曲率顺应离心力场下金属熔体在非惯性坐标系中的运动轨迹。当充型时间为2.91 s时,熔体引入铸件的外环区域,开始对铸件本体进行充型。

值得注意的是,如图3(b)所示,此时铸件底部浇注系统充满熔体,未见明显的金属液断流和空腔。不同于传统大型钛合金铸件采用的直线形浇注系统,本文设计的浇注系统结构虽然延迟了熔体对铸件本体的充型时间,但确保了浇道系统处于饱和状态。实际上,该模式可以有效抑制高速熔体液面负压区吸气倾向,降低熔体卷气总量^[3]。

如图3(c)所示,金属液在6.38 s时通过支板并对铸件内环充型,以包围状缓慢而平稳地向中心均匀填充。换言之,在机匣铸件中可利用铸件支板作为内环充型的浇道。此时,由于进入内环的熔体处于协同状态,熔体的动能和温度损失近似,降低了内环熔体汇流引起的冷隔。整个充型过程中,熔体液面的运动呈渐进的抛物面模式。构建了从机匣外环到中心,从下安装边到上安装边的充型流场,熔体运动相对平稳顺

畅,能够促进型腔内气体的顺利排出。

图4为不同阶段的机匣铸件凝固过程固相分数分布图。图4(a)为凝固中期($t=21$ s)固相分布图,在这个阶段,铸件的主体部分固相率约为40%。这意味着大部分金属液仍然处于液态,处于糊状凝固阶段。在图4(b)中为凝固末期($t=91$ s),此时铸件的主体部分已经基本完成凝固。图中灰色区域表示已凝固的区域,而非灰色区域则代表仍在凝固。可见,黄色未凝固区多处于铸件的型面转接的部位,铸件上端面接近完全凝固,说明冒口有效地转移了厚大部位的热节。此外,尽管机匣内环小端面的散热比表面积更大,但未凝固区显著多于铸件上端,这是由于在该浇注系统构型中熔体从下端引入,持续经过内浇道的熔体改变了局部的温度场,导致冷却凝固的滞后。

为了清晰呈现铸件内部的热节区分布,图4(c)-(e)给出了铸件剖面图和特定位置的放大图。可以看出,与整体视图一致,机匣内外环型面、支板和安装端面完全凝固。图3(d)中存在明显的未凝固区,一方面该位置在结构上属于厚大转接部位,另一方面内部边角区域的散热面积也较小,尤其是锐边结构在制壳时容易出现耐火材料堆积,降低了传热效率。因此,机匣上下流道面连接的圆角根部成为铸件的最后凝固区,可能因为缺少金属液补缩而出现孤立液相区,产生较大尺寸的缩孔。图4(e)中显示了铸件内浇道和机匣流道面结合部位的固相分数分布情况。如图所示,绝大多数的未凝固区域位于内浇道和底部横浇道盘连接位置,从熔体充型角度来看,传输过热熔

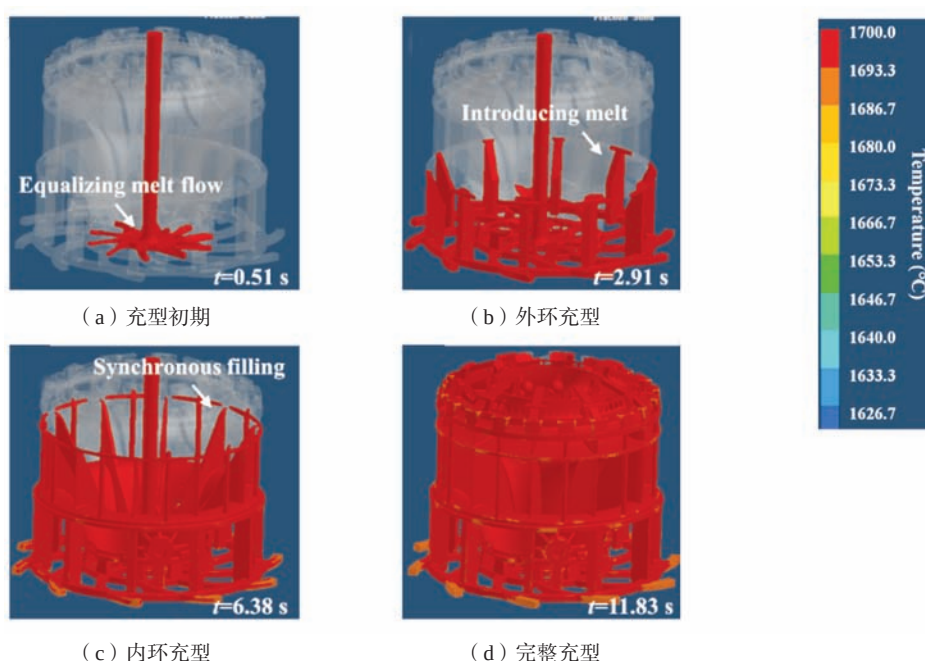
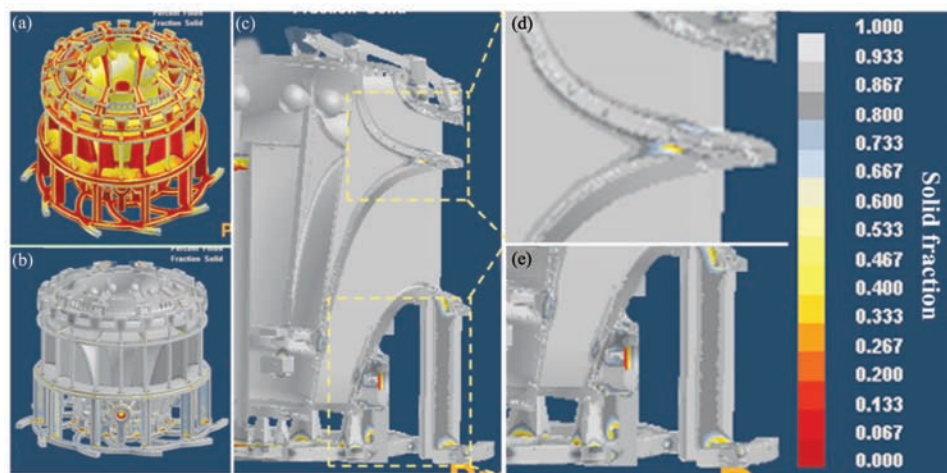


图3 机匣铸件熔体充型行为

Fig. 3 Filling behavior of melt for casing casting



(a) 凝固初期; (b) 凝固末期; (c) 铸件截面; (d) 上下流道面连接的圆角根部; (e) 内环下端及浇道连接区

图4 不同阶段的机匣铸件凝固固相率分布

Fig. 4 Solid phase distribution for casing casting at different stages of solidification and area

体的浇道会引起型壳的温升,致使整个铸件下端处于相对高温的环境。这些部位在实际浇注过程中如果得不到金属液的及时补充,极易发生缩孔和缩松缺陷。因此,必须严格控制内浇道的尺寸与分布,避免热节转移至铸件本体。

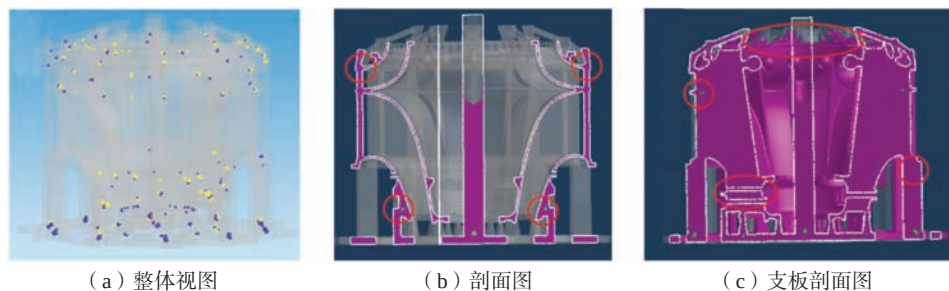
由此可见,燃气轮机钛合金机匣中厚大部位、流道面转接和底部浇道连接区域在凝固末期仍然处于低固相率状态,可认为是主要的热节位置,其形成原因包括散热滞后和底部高温环境。伴随着凝固过程“液固转变”体积收缩和熔池的迁移,上述区域倾向于形成缩松缩孔缺陷,严重地影响铸件的冶金质量,延长了产品交付周期,同时也降低了铸件的尺寸精度和组织均匀性。考虑到钛合金凝固过程复杂性,后文结合模拟缺陷可视化和试铸铸件X光检验结果进一步确认燃气轮机机匣中的缩松缩孔位置。

2.2 数值模拟缩松缩孔缺陷分析

离心力场中液态金属补缩的物理过程与一般重力铸造不同,既有重力作用下的垂直补缩,又存在离心力的径向补缩过程,随着离心半径和转速的增大,补缩主导作用由重力场向离心力场转化^[1]。因此,离心铸

造大型复杂铸件的凝固缺陷分布与传统重力铸造有较大差异。

本文中将Niyama判据设置为0.9,得到燃气轮机大型钛合金铸件凝固后的缩松缩孔分布图,见图5。图5(a)显示了铸件凝固完成后缺陷的整体分布情况,其中孔隙缺陷占铸件总体积的13.68%。如图所示,缩松缩孔并未全部分布于冒口或浇注系统中,在机匣铸件的上下流道面连接根部、厚大凸台和铸件下安装边均出现了一定量的缺陷,这与前文中基于固相分数分布图的分析基本一致。图5(b)-(c)中给出了铸件截面的缺陷视图,机匣的内外环环面中部基本没有缺陷,支板截面也同时显示出良好的冶金质量。铸件剖面上可见,机匣的缩松缩孔主要位于铸件两端的转接拐角。此机匣铸件体积大,收缩大,内圈厚大安装边在进行凝固时,冒口容纳的金属液不足以补缩铸件。而连接圆角根部的厚度是对应流道面壁厚的3倍多,厚大凸台的厚度是对应铸件壁厚的8倍多。过厚的部位由表及里的凝固时,厚大区储存热量,缓慢散热,凝固时间延长,薄壁区域相对于厚大区会提前凝固,阻断补缩通道,使最后凝固的缺陷区域没有补缩源,在后续的凝固收缩过程中出现了缩孔等缺陷。



(a) 整体视图

(b) 剖面图

(c) 支板剖面图

图5 机匣铸件缩松缩孔位置分布

Fig. 5 Shrinkage porosity distribution in casing castings

对于传统的底注式重力铸造工艺而言,充型速度较慢,补缩力场均匀,浇注后的铸件通常仅有一个较大范围的最后凝固区域。在该钛合金机匣离心铸造中,铸件结构尺寸大,浇注系统复杂,一次成形所需的金属液容量极大,离心过程中轻微的偏心现象就会引起非常大的转动惯量,导致型壳破裂甚至设备失稳。不同于已报道文献中的工艺参数,燃气轮机机匣铸造中离心转速设置为80 rpm,在其铸造过程中,重力的影响不容忽视,理论上补缩力场可视为与高度和半径有关的抛物面。非线性充型和补缩力场下,对浇注系统设计提出新的要求,型腔中熔体运动行为和冒口分布改变了凝固温度场。因此离心精铸大型机匣的典型特征之一是具有两个最后凝固区域,分别位于顶部冒口和底部内浇道附近。如图4(c)所示,当前浇注系统中,铸件上端安装边冒口和中心浇道为充满,实际上可能会对铸件的补缩产生不良影响。故燃气轮机钛合金机匣试铸中,需要适当增加中心浇道高

度,以提供足够的充型压力确保冒口完整充填。

2.3 大型钛合金机匣铸件工程验证

基于优化后的浇注系统结构,进行蜡模组合后制备氧化锆-硅溶胶面层体系的陶瓷型壳,开展大型钛合金机匣铸件的试制。图6为大型钛合金机匣铸件样件的实物图和X光检验结果。由图6(a)和图6(d)可知,通过前文构建的浇注系统,燃气轮机大型复杂钛合金铸件完整成形。从图6(d)可见,相较于图6(c),提高中心浇道高度后铸件上端冒口基本充满,略微凹陷是由于对铸件进行补缩,调节浇注系统结构有利于改善铸件补缩。对铸件的內环安装边和铸件上下流道面的圆角根部、厚大安装边及浇道与流道面接触部位进行X光透视检查,可见到完整充填铸件中出现了缩孔,与模拟分析的预测位置基本一致。统计铸件缩孔缺陷的分布,共计22处,其中18处与模拟结果吻合,准确率达到81.8%。

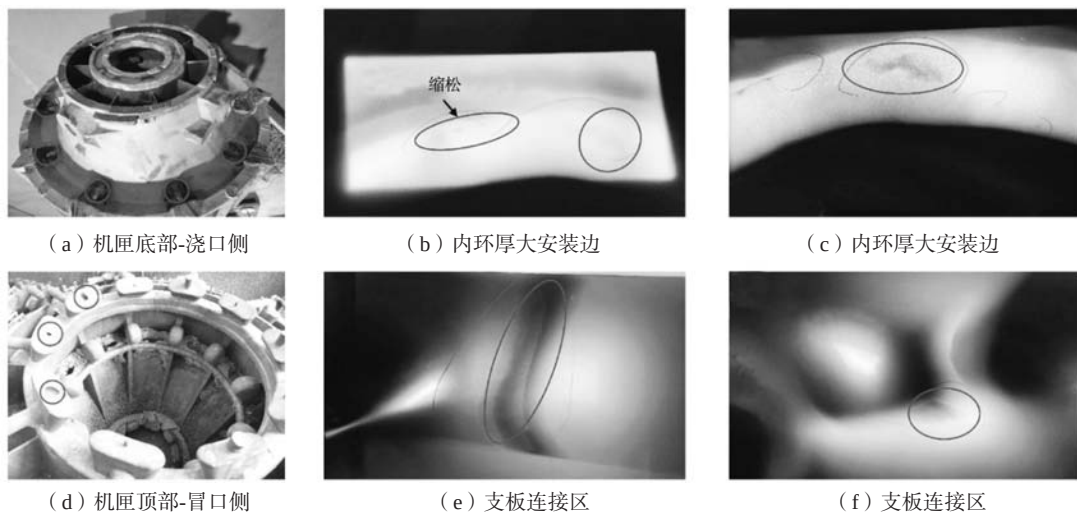


图6 铸件实物及X光透视结果

Fig. 6 Casting physical and X-ray transparency results

2.4 燃气轮机机匣离心精铸工艺改进措施建议

根据模拟结果,要进一步减少或消除机匣铸件内部的收缩缺陷,可通过增大冒口的模数,采用抛物线斜度的冒口或斜度补贴法,补贴效果最好的斜度为 $7^{\circ}\sim 9^{\circ}$,确保铸件顺序凝固,促使热节部位上移^[13]。将安装边用环形冒口进行加厚,再在上面放置带圆弧梯形的冒口,各安装边上冒口进行连接,以提供充足的补缩金属液。在厚大安装凸台内侧,内腔支板后凝固末端,及其他热节部位放置斜锥度冒口进行补缩。根据X光检测结果,为减少缩孔缺陷的大小和体积,在制壳过程中有意识地调控型壳的局部厚度,优化熔体散热条件。制壳过程中严格控制涂料和撒砂的均匀性,或在铸件转接区域使用更薄的型壳涂料,以减少局部

过热倾向。采用更精细的撒砂技术,以形成均匀的型壳结构。对于上下流道面连接的圆角根部等顽固热节区,可以型壳中嵌入冷铁或引入特殊的冷却通道,以提高散热效率。

3 结束语

(1) 分析了燃气轮机机匣的结构特征,设计了直浇道、横浇道和内浇道截面积比例为1:1.5:2.3的开放式底注螺旋型浇注系统,充型过程浇道处于熔体饱和态可抑制吸气倾向,引入支撑杆提升了铸型整体刚度,减少尺寸变形,同时视为横浇道,强化对內环的填充。

(2) 基于ProCAST模拟结果,揭示了冷却凝固过程固相率演变规律,发现机匣中缩松缩孔倾向于在厚

大部位、流道面转接和底部浇道连接处形成,主要原因是补缩不足、散热滞后和底部浇道高温影响。结合试铸铸件X光透视结果,凝固缺陷模拟的预测准确率达到81.8%。

(3) 为进一步提升燃气轮机钛合金机匣冶金质

量,根据模拟和试验件结果,有如下建议:增大内环冒口模数或设置斜度补贴,铸件上安装边采用环形冒口进行加厚,放置带圆弧梯形的冒口强化补缩;上下流道面连接的圆角根部等热节区制壳过程可相对薄化,设置内嵌冷铁或冷却通道,提高散热效率。

参考文献:

- [1] WILLIAMS J. C., BOYER R. R. Opportunities and issues in the application of titanium alloys for aerospace components [J]. Metals, 2020, 10 (6): 705.
- [2] 冉兴, 吕志刚, 曹建, 等. 大型复杂钛合金铸件熔模精密铸造技术 [J]. 铸造, 2021, 70 (2): 139-146.
- [3] 冉兴. 大型环状钛合金铸件立式离心铸造螺旋形横浇道设计 [J]. 稀有金属材料与工程, 2024, 53 (7): 2049-2058.
- [4] 隋艳伟, 袁芳, 李邦盛, 等. 离心铸造钛合金熔体充型流动物理模拟相似理论及实验研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41 (8): 1351-1356.
- [5] 时俊克, 廖敦明, 陈宇豪, 等. 钛合金立式离心熔模铸造凝固缺陷数值模拟 [J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42 (11): 1360-1365.
- [6] 贾国成, 麻毅, 常化强, 等. 倾斜式离心铸造对钛合金铸件质量的优化 [J]. 铸造技术, 2022, 43 (5): 385-388.
- [7] 纪志军, 吴国清, 孙智, 等. 热等静压对ZTC4钛合金铸件内部孔洞缺陷显微组织性能的影响 [J]. 铸造工程, 2022, 46 (4): 18-24.
- [8] PRAYOGA B T, DHARMASTITI R, AKBAR F, et al. Microstructural characterization, defect and hardness of titanium femoral knee joint produced using vertical centrifugal investment casting [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2018, 32: 149-156.
- [9] 宁兆生, 宋克兴, 张彦敏, 等. 高精度钛合金叶轮熔模精密铸造工艺优化 [J]. 铸造, 2022, 71 (6): 751-754.
- [10] 李峰, 崔新鹏, 南海. 基于ProCAST某环状钛合金铸件工艺分析及优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41 (12): 1469-1471.
- [11] 鲁素玲, 曹磊, 郭志红, 等. 基于ProCAST的筒形件卧式离心铸造充型流动模拟 [J]. 铸造, 2019, 68 (9): 1036-1041.
- [12] 孙冰, 王易山, 孙宏喆, 等. ZTA15钛合金小型复杂厚壁类铸件的缩孔分析及工艺改进 [J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43 (1): 102-105.
- [13] 谢成木, 莫畏, 李四清. 钛近净成形工艺 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.

Casting Simulation and Shrinkage Defects Analysis of Large-Scale Titanium Alloy Intermediate Casings for Centrifugal Investment Casting

RAN Xing¹, CHEN Yi-si², GAO Xiao-hui³, LONG Xing-quan³, FU Zhi-peng³, HE Liang-ju⁴, LI Pei-jie²

(1. AVIC Heavy Machinery Co., Ltd., Guiyang 550005, Guizhou, China; 2. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Guizhou Anji Aviation Investment Casting Co., Ltd., Anshun 561003, Guizhou, China; 4. School of Aerospace and Aeronautics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract:

The titanium alloy intermediate casing in gas turbine has the characteristics of large size and complex structure, and the shrinkage porosity defects are easy to appear after integrated forming. In this paper, an open bottom casting spiral gating system was designed with the cross-section ratio of direct runner, cross runner and inner runner of 1:1.5:2.3, according to the structural analysis and the characteristics of centrifugal investment casting. The filling behavior of titanium alloy melt at low centrifugal speed was studied by using Pro-CAST software. The evolution mechanism of solid phase ratio in each region of the casting during solidification was discussed. It was found that the shrinkage porosity in the casing tend to aggregate in the thick part, the channel surface conversion and the bottom gate connection. Due to the insufficient feeding, difficult heat dissipation and the high temperature heat affect zone around the bottom runner. Additionally, the distribution regularities of metallurgical defects in casting simulation and engineering castings were compared after X-ray perspective observation. Based on this, a series of process improvement measures are put forward, which have important engineering value for the subsequent high quality mass production.

Key words:

titanium alloy; casing; numerical simulation; centrifugal casting; solidification defects