

Zr₆₀Ti₄₀ 合金铸造成形数值模拟及验证

张健辉^{1, 2}, 张宁^{2, 3}, 纪志军^{1, 2}, 李峰^{1, 2}, 南海^{2, 3}

(1. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095; 2. 北京市先进钛合金精密成型工程技术研究中心, 北京 100084;
3. 北京航空材料研究院股份有限公司, 北京 100094)

摘要: 以名义成分为Zr₆₀Ti₄₀的钛锆合金为研究对象, 以简单圆筒结构铸件为载体, 对不同铸造工艺及不同铸型材料的方案进行了数值模拟及试验验证工作。数值模拟结果表明, 陶瓷型壳离心浇注及单浇口陶瓷型壳重力顶注方案金属液充型平稳顺畅, 无溅射及汇流现象发生; 金属液补缩效果良好, 铸件内部无大尺度缩孔生成。试验验证显示, 两种方案浇注出的铸件外观无冷隔等表面缺陷, 内部未发现明显的大尺度缩孔、气孔、夹杂等缺陷, 与数值模拟一致性较好。

关键词: Zr₆₀Ti₄₀钛锆合金; 铸造工艺设计; 数值模拟; 冶金质量

钛合金具有密度小、比强度高、热稳定性和耐腐蚀性能良好等优点, 自20世纪50年代起便受到了关注和重视, 目前在航空、航天、兵器、船舶、化工、能源、医疗等军用和民用领域被广泛应用^[1-4]。锆和钛同为元素周期表中的第IVB族元素, 二者原子半径接近, 理化性质相当。由于与钛具有相同的晶格类型, 因此锆在 α -Ti和 β -Ti中均能完全固溶, 生成无限固溶体。基于这一特点, 常通过合金化制备不同比例的钛锆合金^[5-11]。同传统的常规牌号钛合金相比, 钛锆合金具有更为优异的力学性能、耐腐蚀性能、加工性能和焊接性能。尤其是钛锆合金的生物相容性要显著优于钛合金, 因此在生物医疗领域备受青睐, 例如使用钛锆合金制备牙种植体和骨科植入器件。此外, 钛锆合金在核工业、空间技术、武器装备等领域也愈加受到重视^[5, 12-14]。

有关钛锆合金的相关研究, 多集中于其成分设计与优化、强韧化机理、钛锆合金的微观组织与性能的关系、钛锆合金在口腔医学中的临床应用等方面^[5, 15-19]。张玉梅等^[20]对牙科用钛锆合金的铸造性能进行了研究, 证明了钛锆合金的铸造收缩率与纯钛接近而明显高于Ti6Al4V合金, 且型壳温度对合金的收缩率有显著影响。有文献指出, 同常规钛合金相比, 钛锆合金的铸造流动性差别不大, 熔融态金属与铸型之间的反应减弱^[12]。关于钛锆合金的铸造工艺, 尤其是基于其不同于常规钛合金的独特理化性质所做出的具有针对性的浇注系统设计和铸造方式选取, 目前鲜有文献提及。随着钛锆合金的发展日臻成熟, 应用日趋广泛, 有关钛锆合金铸造工艺特别是特种铸造工艺的进一步研究成为钛锆合金推广使用道路上需要予以关注的重点。

从以上角度出发, 本文将展开有关名义成分为Zr₆₀Ti₄₀的典型钛锆合金铸造成形的数值模拟及验证工作。以结构简单的圆筒状样件为载体, 设计不同的浇注系统, 选取不同的铸造工艺和铸型材料。采取数值模拟的手段, 对铸件的充型过程、凝固过程和内部缺陷分布展开预测, 以此为基础进行迭代优化和筛选, 确定最终的浇注方案, 并据此进行试验验证, 以实际铸件的成形情况和内部质量对数值模拟结果进行验证, 评价浇注方案的优劣和数值模拟结果的准确性。为后续结构更为复杂的钛锆合金铸件的研发提供参考依据, 推动钛锆合金在制造业的广泛应用。

作者简介:

张健辉(1996-), 男, 工程师, 硕士研究生, 研究方向为钛合金及钛合金铸造。E-mail: zhangjianhui89@126.com

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

04-0481-08

基金项目:

冲击环境材料技术重点实验室基金(6142902230102)。

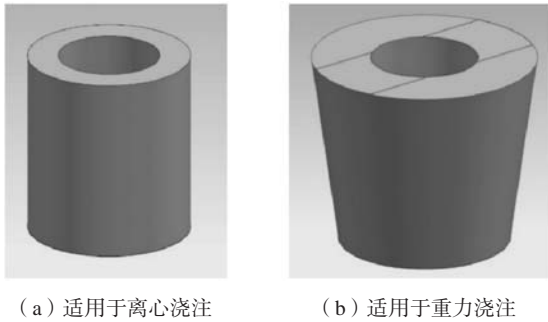
收稿日期:

2023-05-26 收到初稿,

2023-12-30 收到修订稿。

1 试验材料及方法

本文依托的样载体为结构简单的圆筒状铸件，铸件毛坯高90 mm，外径和内径分别为 $\Phi 80$ mm和 $\Phi 50$ mm，壁厚15 mm，对于重力浇注而言，在此基础上由毛坯底端面出发向外增设了 8° 的拔模斜度，如图1所示。



(a) 适用于离心浇注 (b) 适用于重力浇注

图1 铸件毛坯示意图

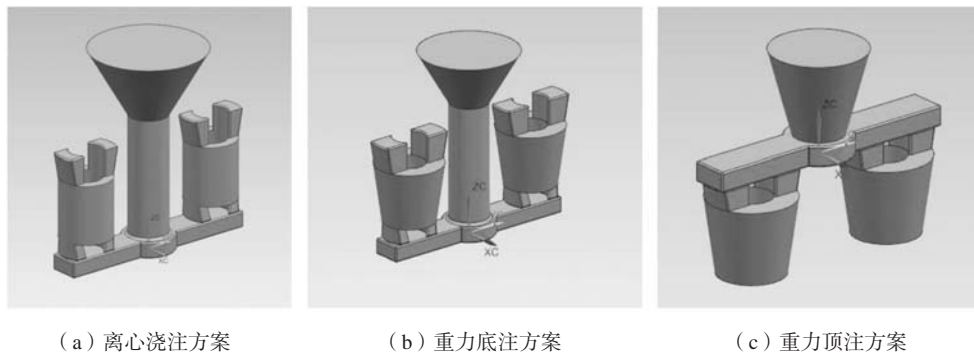
Fig. 1 Schematic diagrams of casting blanks

以名义成分为 $Zr_{60}Ti_{40}$ 的钛锆合金作为本文研究的母合金对象，试验验证用的钛锆合金铸锭由北京航空材料研究院提供。浇注方式包括离心浇注、重力底注和重力顶注。铸型种类包括砂型、石墨铸型和陶瓷型壳，数值模拟根据汇总于表1的浇注方案执行。初期设计的铸造工艺如图2所示。

针对以上的不同浇注方案，采用ProCAST软件依次计算铸件的充型过程、凝固过程和成形后内部缺陷分布情况。浇注材料为 $Zr_{60}Ti_{40}$ ，使用ProCAST中的Scheil模型计算其包括固相分数、粘度和换热边界条件在内的相关热物性参数，如图3所示。浇注温度为 $1600^\circ C$ ，型壳预热温度为 $200^\circ C$ ，离心浇注以直浇道中心为旋转轴自转，转速为 150 r/min ^[21-24]。试验验证时，铸件浇注成形后，使用X射线透照技术对实际铸件内部质量情况进行探测和评价。

表1 浇注方案汇总
Table 1 Summary of pouring schemes

铸型	离心浇注	重力底注	重力顶注
砂型	—	砂型重力底注	砂型重力顶注
石墨铸型	—	石墨铸型重力底注	石墨铸型重力顶注
陶瓷型壳	陶瓷型壳离心浇注	陶瓷型壳重力底注	陶瓷型壳重力顶注



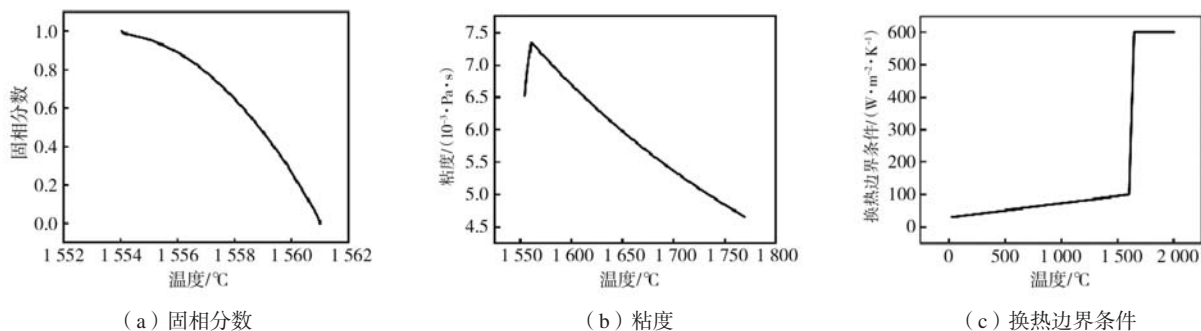
(a) 离心浇注方案

(b) 重力底注方案

(c) 重力顶注方案

图2 铸造工艺设计

Fig. 2 Casting process design



(a) 固相分数

(b) 粘度

(c) 换热边界条件

图3 $Zr_{60}Ti_{40}$ 相关热物性参数

Fig. 3 Related thermal property parameters of $Zr_{60}Ti_{40}$

2 结果与分析

2.1 初始浇注方案数值模拟

陶瓷型壳离心浇注, 其充型和凝固数值模拟结果如图4所示。金属液自直浇道进入浇注系统后沿横浇道和底浇口进入本体。由于受离心力的作用, 金属液沿距直浇道较远的外壁面上升充填, 距直浇道越远的位置金属液的液面越高, 距直浇道中心等距位置的液面高度基本相同, 液面整体呈两侧高中间低的抛物面形状。金属液最后充满冒口结构, 能够有效将气体和夹杂及时排出^[25-26]。完整充型耗时约4.8 s。金属液充型过程稳定顺畅, 未发生明显的溅射和汇流现象。凝固数值模拟结果表明, 铸件的冒口和底浇口结构率先完成凝固, 本体中部最后完成凝固。

不同种类铸型重力底注的充型和凝固数值模拟结果如图5所示。金属液自底浇口进入本体后, 液面平稳上升。凭借压头的重力势能, 金属液自下而上顺序充填铸型, 最后充填顶端冒口, 气体和夹杂可通过顶端冒口排出。三种铸型完整充型均耗时4.0 s左右, 充型过程稳定, 无明显的汇流和溅射现象发生。由于铸件本体为倒锥形结构, 铸件上端为厚大的热节区, 在金属液冷却凝固的过程中, 顶端冒口率先凝固, 铸件本体上端凝固顺序滞后, 金属液不能及时补充, 可能导致铸件上端热节区域产生内部缩孔。铸型材质对金属液的冷却凝固有较大影响, 三种铸型中: 陶瓷型壳金属液完全凝固耗时约330 s, 砂型金属液完全凝固耗时约300 s, 石墨铸型金属液凝固最快, 耗时约170 s。其原

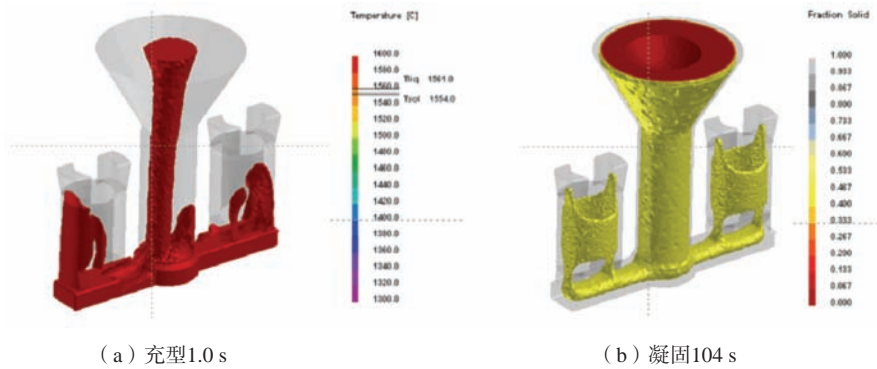


图4 陶瓷型壳离心浇注方案充型及凝固数值模拟结果

Fig. 4 Numerical simulation results of mold filling and solidification for centrifugal pouring using ceramic shell scheme

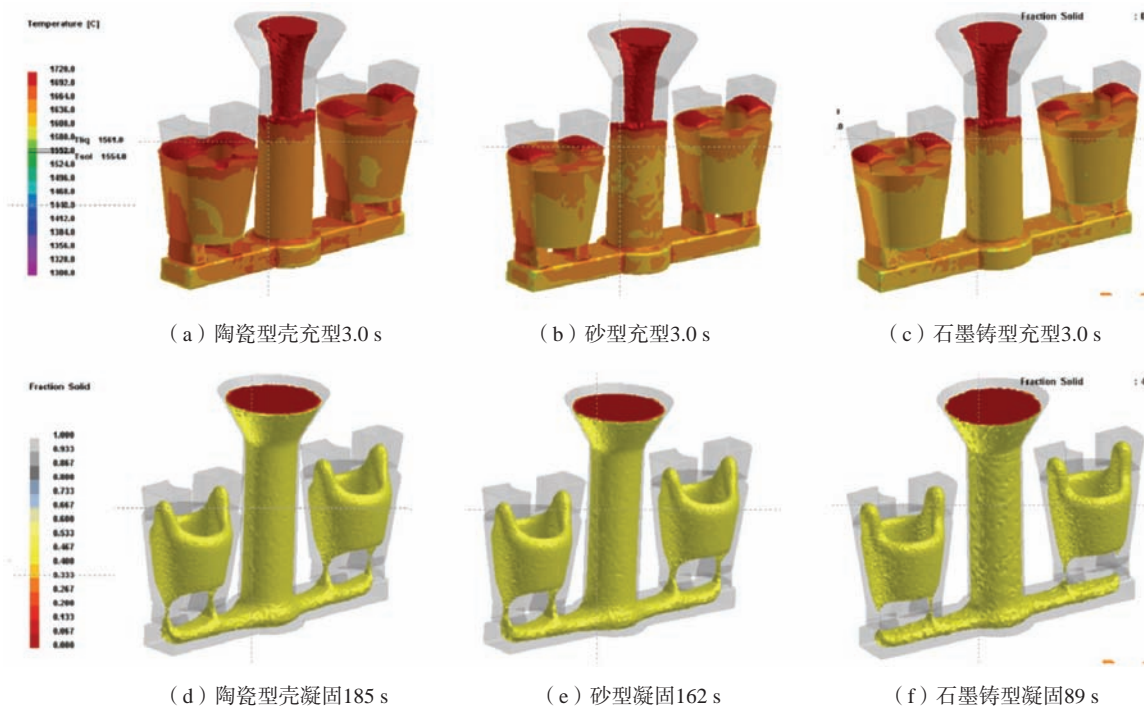


图5 重力底注方案充型及凝固数值模拟结果

Fig. 5 Numerical simulation results of mold filling and solidification for gravity bottom pouring schemes

因在于石墨铸型导热性好,铸型与空气辐射传热强,而陶瓷型壳导热性较差,其内部的氧化钼和煤矸石等成分具有保温作用,且陶瓷型壳与金属液发生界面反应散发热量,减缓金属液的凝固过程。因此金属液在陶瓷型壳中的冷却凝固速度明显慢于其在石墨铸型中的冷却凝固速度^[27]。

初始设计的不同铸型重力顶注方案,在倒锥形铸件本体顶端设置了两个浇口,图6为不同铸型重力顶注方案充型和凝固的数值模拟结果。金属液自浇杯进入浇注系统后,沿横浇道分别注入两个顶浇口分两股充型,两股液流在型腔内部发生了汇流现象。金属液发生汇流时,速度分布不均匀、流场紊乱程度高,极易

在液流交汇处产生冷隔缺陷及氧化夹杂^[28]。从金属液充型顺序来看,重力顶注方案排出气体和夹杂的效果可能不如离心浇注方案和重力底注方案。重力顶注方案充型耗时同重力底注方案相比相差不大。对凝固的数值模拟结果表明,铸件本体底端部位凝固后,顶浇口、横浇道和浇杯能起到及时补充金属液的作用,因此同重力底注方案相比,重力顶注方案浇注系统补缩能力较好,内部缩孔分布也应较少。对于不同铸型材料而言,陶瓷型壳和砂型金属液凝固时间接近,石墨铸型金属液凝固最快,该现象与重力底注方案一致。同种铸型材料,重力顶注和重力底注金属液冷却凝固耗时并无较大差别。

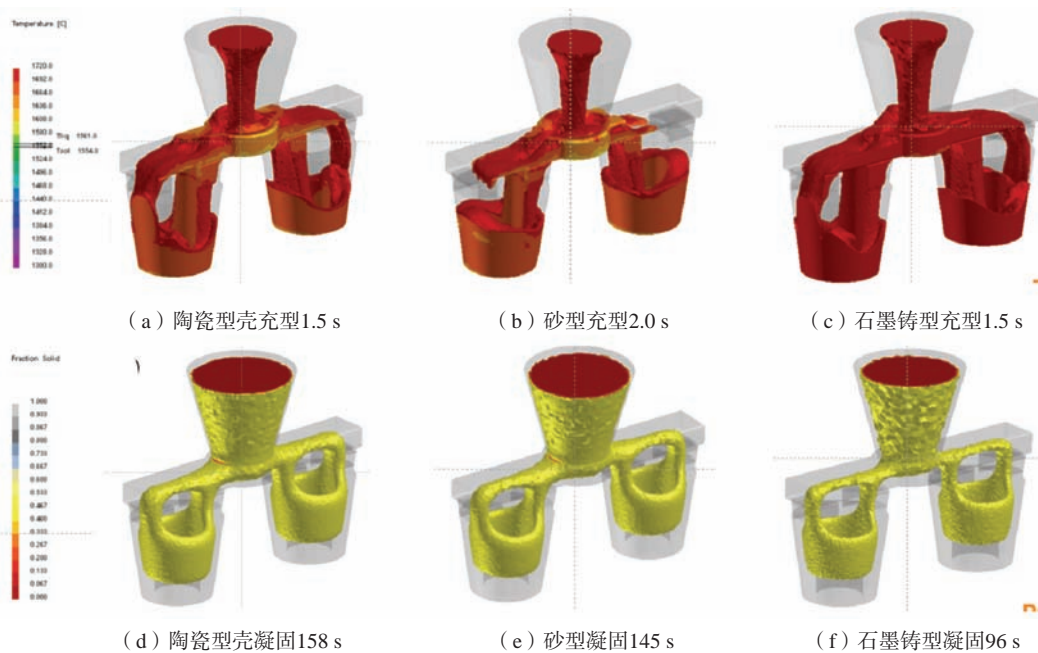


图6 重力顶注方案充型及凝固数值模拟结果

Fig. 6 Numerical simulation results of mold filling and solidification for gravity top pouring schemes

各浇注方案内部缺陷分布情况数值模拟结果如图7所示。重力底注浇注方案补缩效果最差,内部缩孔最大,体积为1.9~2.0 cm³,且由于顶端冒口凝固较早,未能将铸件本体中的缩孔完全提出,本体上端厚大热节处内部仍残留部分缩孔。对于重力顶注浇注方案而言,铸型材质不同,内部缩孔分布情况存在差异:陶瓷型壳方案冒口补缩效果最好,缩孔仅分布在顶端冒口处,铸件本体内部未发现大体积的缩孔;石墨铸型方案冒口未将铸件内部缩孔完全提出,铸件本体上端厚大热节处内部有少量体积较小的缩孔存在,这与石墨铸型散热效果好、金属液冷却凝固快、补缩及时性差有关;砂型方案冒口补缩效果最差,铸件本体上端厚大热节处存在体积很大的缩孔。陶瓷型壳离心浇注方案铸件内部质量情况最好,顶端冒口能将铸件内部缩

孔有效提出,冒口内缩孔体积为0.16~0.3 cm³,铸件内部未发现明显的缩孔,结合凝固数值模拟结果分析,顶冒口区域属于热节区,凝固过程中会形成聚集性缩孔,而筒体内部虽然没有明显的聚集性大体积缩孔,但由于其凝固顺序滞后,因此会生成体积小且分散的疏松类缺陷。

2.2 优化后浇注方案数值模拟

基于上述对初期浇注方案充型过程、凝固过程和内部缺陷分布的数值模拟结果,对各浇注方案进行了迭代优化:重力底注方案铸件内部质量最差,因此将该方案淘汰;陶瓷型壳离心浇注方案铸件内部质量最好,因此将其予以保留;对于重力顶注浇注方案而言,由于分支顶浇口的设置导致金属液充型时产生了

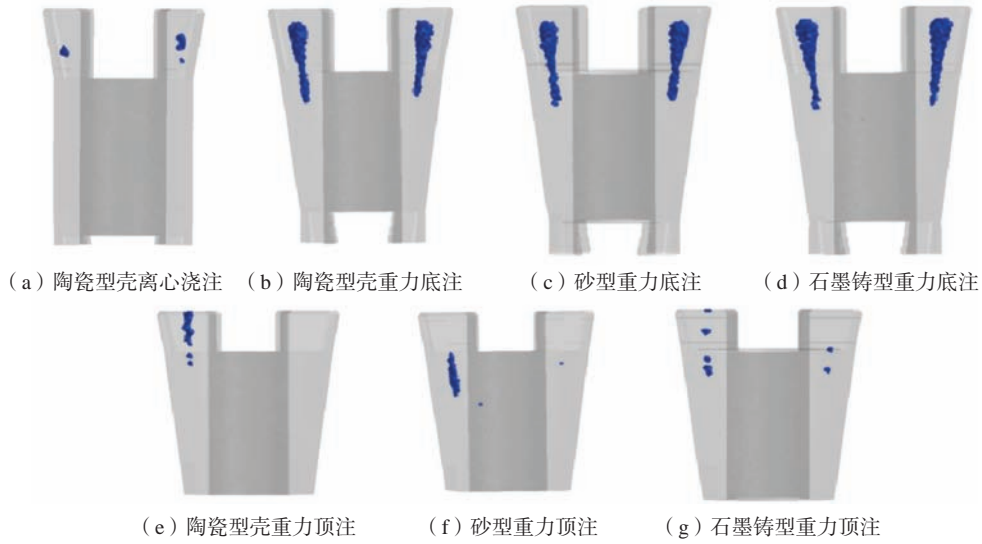


图7 各方案内部缺陷分布数值模拟结果

Fig. 7 Numerical simulation results of internal defect distribution in each scheme

分流汇流现象，铸件内部有产生冷隔及氧化夹杂的风险，因此取消掉该方案中的一个顶浇口，并且将横浇道长度减半，规避金属液的汇流现象同时提高金属利用率，此外由于陶瓷型壳重力顶注方案的内部质量情况优于另两种型壳，因此将砂型重力顶注方案和石墨铸型重力顶注方案淘汰，优化后的陶瓷型壳重力顶注方案浇注系统设计图如图8所示。

对优化后的陶瓷型壳重力顶注方案进行了充型过程、凝固过程和内部缺陷分布情况的数值模拟，模拟参数不变。充型和凝固的数值模拟结果如图9所示。减少浇道数量后，金属液从仅存的一个顶浇口进入铸型。同优化前相比，金属液在铸型内部不再发生汇流，单股金属液流自下而上注满整个型腔。最终完成充型部位为铸件上端未安置浇口处，铸型内的夹杂和气体有不能及时排出的风险。铸型主体部分浇注完毕耗时约2.6 s，充型过程平稳顺畅。凝固计算结果显示，

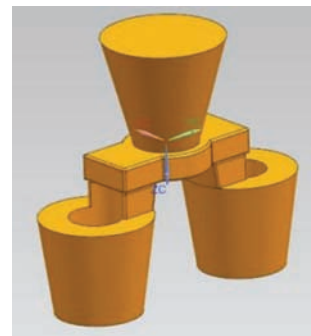


图8 优化后陶瓷型壳重力顶注方案

Fig. 8 Gravity top pouring using ceramic shell after optimization

铸件由外向内逐渐冷却凝固，顶浇口为最后凝固部位，能有效起到及时补充金属液的作用。铸件内部缺陷分布的数值模拟结果如图10所示，同图7e相比，优化后的陶瓷型壳重力顶注浇注方案铸件内部冶金质量

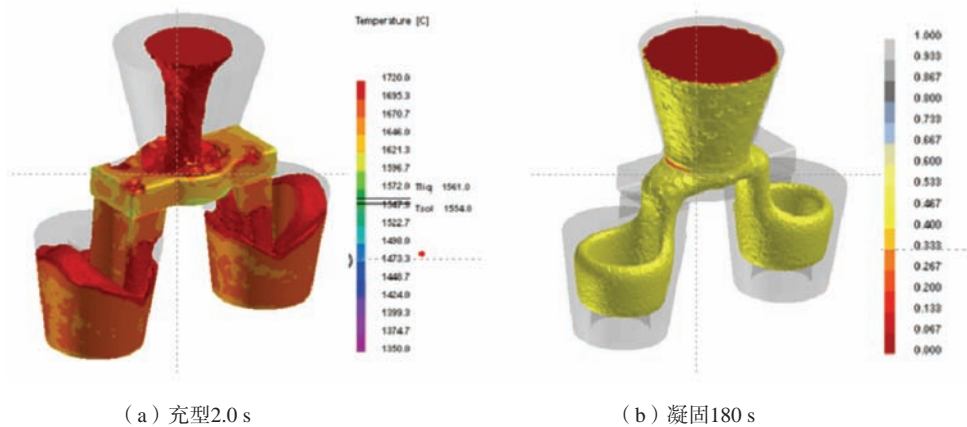


图9 优化后陶瓷型壳重力顶注方案充型和凝固数值模拟结果

Fig. 9 Numerical simulation results of mold filling and solidification for the optimized gravity top pouring using ceramic shell scheme

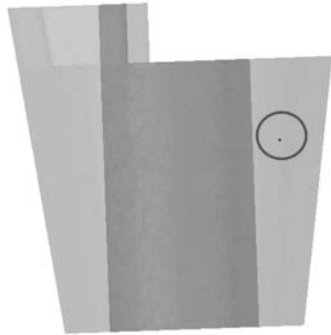


图10 优化后陶瓷型壳重力顶注方案内部缺陷分布数值模拟结果
Fig. 10 Numerical simulation results of internal defect distribution for the optimized gravity top pouring using ceramic shell scheme

有了进一步改善, 铸件内部缩孔尺度在 0.04 cm^3 左右。表2为不同方案内部缩孔体积数值模拟结果。

表2 不同方案内部缩孔体积数值模拟结果
Table 2 Numerical simulation results of internal shrinkage cavity volumes for different schemes cm^3

铸型	离心浇注	重力底注	重力顶注 (优化前)	重力顶注 (优化后)
砂型	—	—	1.5	—
石墨铸型	—	1.9~2.0	0.3	—
陶瓷型壳	0.16~0.3	—	0.2	0.04

2.3 试验验证

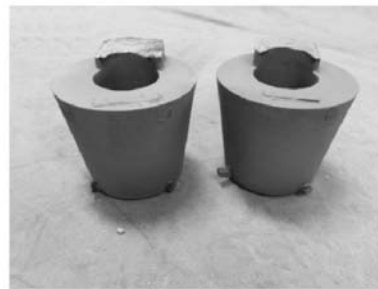
通过对上述不同浇注方案的充型过程、凝固过程和内部质量进行数值模拟, 最终保留陶瓷型壳离心浇注和优化后的陶瓷型壳重力顶注为最佳浇注方案, 并以这两种方案为依据展开试验, 对数值模拟结果进行验证。其中, 对优化后的陶瓷型壳重力顶注方案充型数值模拟结果表明, 铸型内的夹杂和气体有不能及时排出的风险, 因此在试验验证时, 在蜡模下方设置出气针。

图11为浇注后的铸件外观质量, 检视的结果表明, 两种方案铸件均完整成形, 未发生欠铸现象, 同时铸件表面也没有明显的冷隔和鼓胀等缺陷。铸件良好的外观质量印证了充型过程数值模拟结果的准确性。

对浇注后的铸件进行X光透照以评价铸件内部的冶金质量, 图12的X光透照结果表明, 重力顶注方案, 铸件内壁可观察到部分疏松, 离心浇注方案铸件内部未发现明显缺陷。经喷砂及化学清洗后, 对铸件进行了热等静压处理。热等静压的目的是使铸件内部的缩孔等缺陷弥合, 如果铸件内部存在体积较大的皮下缩孔, 热压后铸件表面会存在明显的凹坑。图13对热等静压后铸件的外观质量检测的结果表明, 热等静压后铸件表面未发现明显的压坑。结合对浇注后铸件的X光透照结果, 两种浇注方案铸件内部冶金质量良好, 没



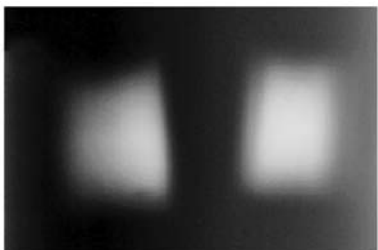
(a) 陶瓷型壳离心浇注



(b) 陶瓷型壳重力顶注

图11 浇注后铸件外观质量检视结果

Fig. 11 Inspection results of casting appearance quality after pouring



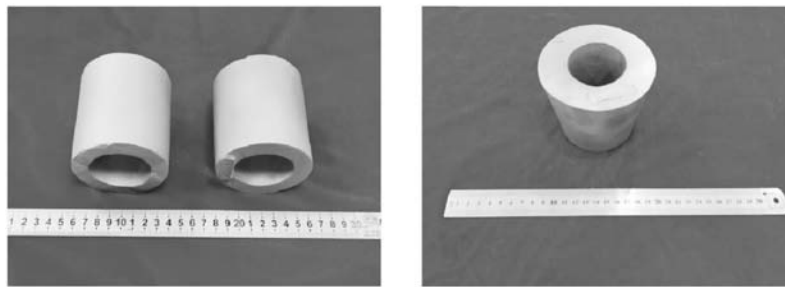
(a) 陶瓷型壳离心浇注



(b) 陶瓷型壳重力顶注

图12 浇注后铸件内部冶金质量检视结果

Fig. 12 Inspection results of casting appearance quality after pouring



(a) 陶瓷型壳离心浇注

(b) 陶瓷型壳重力顶注

图13 热等静压后铸件外观质量检视结果

Fig. 13 Inspection results of casting appearance quality after hot isostatic pressing

有明显的大体积缩孔，与凝固过程和铸件内部质量的数值模拟结果一致。

3 结论

本文以名义成分为 $Zr_{60}Ti_{40}$ 的钛锆合金为研究对象，以简单圆筒状样件为载体，对钛锆合金的铸造成形过程进行了研究，重点对不同铸造工艺和不同类别铸型的充型过程、凝固过程和内部缺陷分布进行了数值模拟及验证，得出如下结论。

(1) 陶瓷型壳离心浇注方案金属液充型平稳顺畅，无明显汇流溅射现象，浇冒系统补缩效果良好，有效避免铸件生成冷隔、夹杂、气孔和内部缩孔等缺陷。不同铸型重力底注方案金属液充型顺畅，但补缩

效果差，内部缩孔体积明显大于其他方案。双浇口重力顶注方案金属液分股注入铸型，两股金属液在铸型内部发生汇流会导致铸件表面生成冷隔及氧化夹杂等缺陷；改为单浇口重力顶注后，金属液单股充型，无汇流现象发生，且凝固过程数值模拟结果显示浇冒系统补缩效果好，铸件内部无较大尺度的缩孔生成。

(2) 对陶瓷型壳离心浇注的单浇口陶瓷型壳重力顶注的试验验证结果表明，这两种方案浇注出的铸件均具有较好的冶金质量，铸件表面无明显的冷隔、鼓胀等缺陷，X光透照未发现铸件内部有明显的缩孔、夹杂、气孔等缺陷。与前期计算结果一致，印证了数值模拟结果的准确性。

参考文献:

- [1] 宋浩, 韩冬, 赵军, 等. 钛合金熔模精密铸造技术的发展现状 [J]. 铸造, 2020, 69 (12): 1304-1311.
- [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] 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.
- [4] 张健辉, 纪志军, 冯新, 等. ZTA15铸造钛合金高周疲劳性能研究 [J]. 精密成形工程, 2022, 14 (6): 28-35.
- [5] 景然, 王永善, 叶茜, 等. 新型高强韧钛锆合金研究进展 [J]. 铸造技术, 2018, 39 (10): 2420-2424.
- [6] 崔娟. 新型钛锆合金腐蚀特性及其耐腐蚀机理研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019: 4-5.
- [7] 王迪. 激光增材制造Ti-Zr合金的组织与性能 [D]. 大连: 大连理工大学, 2018: 12-13.
- [8] 炊鹏飞. Nb含量对 $Zr_{50}Ti_{50}$ 合金显微组织及力学性能影响 [J]. 材料热处理学报, 2018, 39 (12): 37-41.
- [9] 冯亮, 李金山, 崔予文, 等. Ti-Zr二元合金在 β 相区的互扩散行为研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40 (4): 610-614.
- [10] 徐丽丽, 徐勇, 许荣福, 等. 基于Ti-Nb-Zr三元系合金的相图优化 [J]. 山东科学, 2021, 34 (1): 35-42.
- [11] 刘佳妮. 合金元素对钛锆合金力学性能的影响 [D]. 杭州: 浙江大学, 2020: 4-5.
- [12] 鄢辉. Ti-Zr二元合金显微组织和力学性能的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2017: 16-17.
- [13] 李岩, 姚礼, 崔晓龙, 等. 二元Ti-Zr合金微观结构和形状记忆效应 [J]. 稀有金属, 2015, 39 (8): 673-679.
- [14] 周洪雷, 侯峰起, 郝玉琳. 低电子浓度Ti-Nb-Zr合金组织及性能研究 [J]. 材料研究学报, 2019, 33 (1): 27-33.
- [15] 张曼雪. 钛锆基生物医用合金成分设计及性能研究 [D]. 汉中: 陕西理工大学, 2022: 4-5.
- [16] 叶文君. 生物医用Ti-Nb-Zr系合金的组织与性能关系研究 [D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2012: 1-3.
- [17] 刘清雪, 李永强. 不同退火温度下Zr-Ti合金组织及力学性能的研究 [J]. 铸造技术, 2014, 35 (11): 2588-2590.
- [18] 赵军, 樊洪, 于澄. 钛锆合金种植体的临床应用研究 [J]. 医学理论与实践, 2019, 32 (14): 2178-2179.
- [19] 程亚珍, 柴自毫, 李勃勃, 等. 一种医用钛合金铸件熔模铸造工艺设计 [J]. 铸造, 2022, 71 (3): 362-366.

- [20] 张玉梅, 郭天文, 李佐臣. 牙科用Ti-Zr合金铸造收缩性的研究 [J]. 临床口腔医学杂志, 2000 (4): 195-197.
- [21] 许庆彦. 熔模铸造过程数值模拟研究进展 [J]. 铸造, 2022, 71 (7): 803-813.
- [22] 殷建锋, 李峰, 南海. 异形薄壁钛合金铸件熔模铸造成形数值模拟及验证 [J]. 铸造, 2022, 71 (1): 71-76.
- [23] 崔新鹏, 孙志雨, 李峰, 等. 某种钛合金精密成形铸件铸造变形的数值模拟 [J]. 精密成形工程, 2018, 10 (3): 149-153.
- [24] 崔新鹏, 张晨, 范世玺, 等. 钛合金框架铸件铸造变形和应力的数值模拟 [J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35 (3): 257-259.
- [25] 王欢, 王红红, 周建新, 等. 复杂钛合金铸件立式离心铸造过程的数值模拟 [J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35 (2): 178-181.
- [26] 王晓林, 赵志龙, 马余选, 等. 大型复杂ZTC4合金铸件的充型凝固过程模拟 [J]. 特种铸造及有色合金, 2011, 31 (6): 517-520.
- [27] 宗学文, 刘文杰, 高中堂, 等. 不同铸型对钛合金微观组织及力学性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49 (5): 1681-1688.
- [28] 刘铁军. 钛合金叶轮离心铸造数值模拟研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 13-14.

Numerical Simulation and Verification on $Zr_{60}Ti_{40}$ Alloy Casting

ZHANG Jian-hui^{1,2}, ZHANG Ning^{2,3}, JI Zhi-jun^{1,2}, LI Feng^{1,2}, NAN Hai^{2,3}

(1. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. Beijing Engineering Research Center of Advanced Titanium Alloy Precision Forming Technology, Beijing 100084, China; 3. BAIMTEC Material Co., Ltd., Beijing 100094, China)

Abstract:

Taking titanium-zirconium alloy with nominal composition of $Zr_{60}Ti_{40}$ as the research object and simple cylinder structure castings as the carrier, numerical simulation and experimental verification of schemes of different casting processes and different mold materials were carried out. The simulation results show that metal liquid filling is smooth for the centrifugal pouring using ceramic shell and the gravity top pouring using single gate ceramic shell, and no sputtering and confluence phenomenon appear. Liquid metal feeding effect is good, and no large scale shrinkages generate in the castings. According to the experimental verification, there are no surface defects such as cold shut on the appearance in the castings, and no obvious defects such as large-scale shrinkage, blowhole and inclusion are found inside the castings, which is in good agreement with the numerical simulation results.

Key words:

$Zr_{60}Ti_{40}$ titanium-zirconium alloy; casting process design; numerical simulation; metallurgical quality
