

钛合金铸造用支撑座砂芯改性工艺研究

李重阳¹, 白志宇², 刘时兵¹, 韩鹏江³, 刁云峰³, 李鸿举¹, 李昕祺¹

(1. 中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司, 高端装备铸造技术全国重点实验室, 辽宁沈阳 110022;
2. 北京航天动力研究所, 北京100076; 3. 空军装备部驻辽阳地区军事代表室, 辽宁辽阳 111000)

摘要: 简要分析了某支撑座型芯常规材质制备的局限性, 提出了一种基于3D打印砂芯的钛合金铸造用砂芯改性工艺。通过两次无机粘结剂的浸渗、焙烧处理, 使砂芯在具备一定强度的同时维持高的尺寸精度, 并且具有十分优异的脱芯能力。在实际生产验证中, 铸件表面质量高, 荧光检测无明显线性缺陷, 铸件表面污染层厚度小于20 μm。

关键词: 钛合金; 支撑座型芯; 3D打印砂芯; 无机粘结剂

近年来, 伴随着宇航业和国防工业的迅猛发展, 钛合金的使用量和应用水平都获得了质的提升, 钛合金铸造工艺也得到了长足的进步与发展, 铸件的质量要求也在不断提高。复杂化、一体化逐渐成为钛合金铸件主要发展趋势之一, 因此型芯的使用变得十分重要, 可以减少不必要的焊缝, 保证铸件的整体性能, 提高铸件设计的自由度。型芯一般用来成形铸件空腔结构或封闭式内腔, 复杂的结构对于铸件表面的修补、脱芯工序造成了很大的困难, 因此对型芯成形的铸件表面质量、尺寸精度和脱芯方法提出了更高的要求。

钛合金铸造中常用的型芯可分为三种: 金属芯、石墨芯、陶瓷芯。

采用金属芯制备型芯, 若成形区域大, 浇注过程中金属芯的蓄热量也会随之增大, 易受热膨胀, 从而产生表面质量缺陷^[1-2]。当成形结构为封闭内腔时, 脱芯工艺只能采用化学腐蚀法, 需要的酸洗腐蚀时间也会随之增加。石墨芯对于大尺寸开放式型腔的成形具有一定优势, 若成形尺寸小、跨度较大, 则需要考虑固定端与成形区域之间的连接强度, 是否满足钛合金浇注过程中高离心转速的要求。忽略基于石墨本身的激冷特性可能会在铸件表面产生缺陷这一现象, 当成形封闭复杂内腔时, 不利于机械力破坏脱芯, 喷砂操作也十分困难。陶瓷芯的成形质量最为优异, 但其高温烧结后强度比石墨芯更高, 脱芯难度更大。

砂型(砂芯)在铸钢、铝合金^[3]铸造上应用十分广泛, 尚未有直接在钛合金铸造上应用的报道。不少研究人员^[4-6]采用莫来石、锆英砂、镁橄榄石、铝矾土等耐火性能较好的原砂对传统硅砂进行替代, 结合硅溶胶、锆溶胶等无机粘结剂, 高温烧结制备的砂型(砂芯), 也取得了成功应用。但该法制备的砂芯依赖模具成形, 可制备复杂程度低。同时铸件表面质量差、尺寸超差、砂型的回收再利用等许多问题, 都有待得到更好地解决方案。

本研究基于3D打印砂芯工艺, 提出了钛合金铸造用砂芯改性工艺。在3D打印砂芯的高效、复杂的基础上, 进行无机粘结剂的浸渗、焙烧工艺, 改性后的砂芯尺寸强度、精度高, 耐高温性能优异, 且脱芯方法简单有效, 完全满足支撑座型芯的需求。

1 支撑座型芯结构特点

应实际生产需要, 制备一种航空航天用内翼副接头钛合金铸件, 该铸件成形结构复杂, 共需四种不同型芯。图1为其中某支撑座型芯, 成形结构为底座上表面、芯

作者简介:

李重阳(1995-), 男, 硕士生, 研究方向为钛合金铸造。电话: 17512404691, E-mail: sriflicy@163.com

中图分类号: TG221

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

08-0980-06

基金项目:

国家重点研发计划(2020 YFB2008303)。

收稿日期:

2023-03-22 收到初稿,

2023-06-01 收到修订稿。

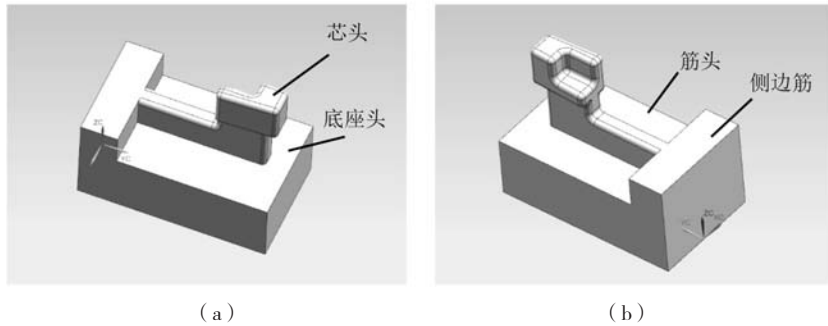


图1 某支撑座型芯
Fig. 1 The core of a support seat

头、横筋与侧边筋形成的封闭内腔。该型芯底部为较厚大的底座，尺寸为115 mm × 70 mm × 38 mm，该部位卡在石墨型中起固定作用。底座上部中间的横筋较薄，仅有12 mm，与其相连的侧边筋厚度为23 mm，两处筋结构高度相同，为19 mm。芯头位于横筋的另一侧上端，轮廓形状为38 mm × 18 mm × 25 mm，宽度大于底部横筋，最薄处为8 mm，边角处均做圆角处理。

2 支撑座砂芯改性工艺

无机粘结剂的选择取决于粘结剂的加热硬化机理^[7]，水玻璃可在较低温度下迅速硬化，在加热硬化过程中，能够在有机粘结剂完全挥发前硬化。但水玻璃高温性能差，在反复焙烧后基体内易产生裂纹，且存在高温软化现象，因此需选取二醋酸锆、硅溶胶、硅酸乙酯等高温性能好的无机粘结剂进行二次浸渗、焙烧，保证砂芯在多次焙烧后仍具有较高的强度和尺寸精度。

3D打印支撑座砂芯如图2所示，本研究分别采用水玻璃和硅溶胶，两阶段浸渗、焙烧工艺，对砂芯进行改性。同批次打印多组八字块与长方体试样，用于工艺各阶段砂芯抗拉强度与抗弯强度的测试。

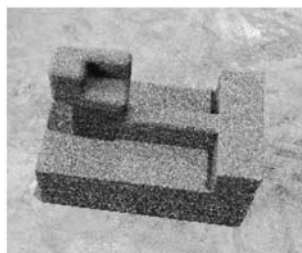


图2 3D打印支撑座砂芯
Fig. 2 Support sand core prepared by 3D printing

2.1 水玻璃浸渗、焙烧工艺

使用的水玻璃为常规钠水玻璃，主要成分为硅酸钠，模数（钠水玻璃中二氧化硅与氧化钠的摩尔比

值）2.4~2.8，该模数下的钠水玻璃溶液十分粘稠，所以需要与水进行一定比例的稀释。水玻璃浓度过高会在硬化过程中发生体积膨胀，造成砂芯变形；若水玻璃浓度过低，则无法在砂芯内有机粘结剂和水分快速挥发的同时完全硬化，导致砂芯不完全成形。不同稀释比的水玻璃焙烧后形貌如图3所示，其中以水玻璃与水稀释比为1:3时，砂芯表面无开裂、破损现象，成形效果最好。

水玻璃高温软化温度区间为700~800℃，为了保证砂芯在焙烧过程中不发生变形，一次焙烧温度上限应低于该温度区间。图4所示分别为焙烧温度上限530℃、580℃、630℃和680℃烧后砂芯形貌图，焙烧工艺为150℃、保温60 min后，升温至上限温度保温60 min。当上限温度为530℃时，砂芯内存在大量散砂，形成的硬化层厚度低于3 mm，砂芯整体强度低，易破碎。主要原因在于砂芯内大量的水玻璃无法在该温度和保温时间下完全迅速硬化，可以通过提高焙烧温度和保温时间来保证水玻璃硬化完全。当温度升至580℃时，砂芯的硬化层厚度增大，底部、芯头及筋处成形完整，强度较高，但在底座上表面仍存在部分缺陷。砂芯底座较厚，底部与炉体接触升温快，水分从砂芯内部向上挥发，导致底座上表面水玻璃硬化过程延后，强度较低产生破损。当温度升至630℃时，砂芯表面无破损，成形完整，整体强度高，无明显变形。继续升温至680℃，由于产生局部过热现象，芯头部分发生变形。因此根据实验结果可知，在焙烧保温时间不变的前提下，焙烧上限温度为630℃时，砂芯的成形效果最佳。

2.2 硅溶胶浸渗、焙烧工艺

硅溶胶在钛合金精密铸造中通常作为过渡层或者背层粘结剂，本研究采用的硅溶胶，二氧化硅的含量为27%，粒径为10~12 nm。一次浸渗、焙烧后的砂芯为多孔结构，硅溶胶流动性高，浸渗操作简单、迅速。在加热硬化过程中，硅溶胶不存在与水玻璃类似

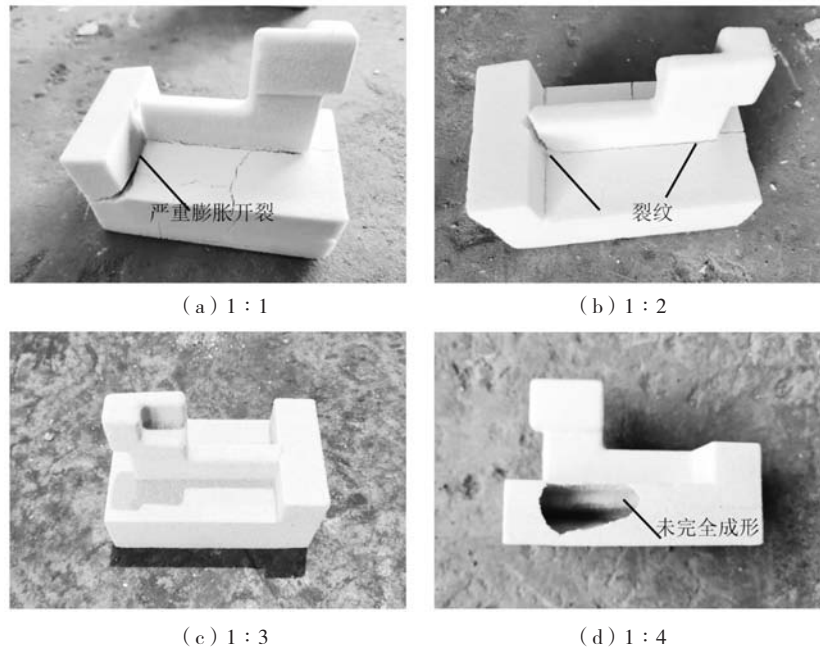


图3 不同水玻璃稀释比烧结后砂芯形貌

Fig. 3 Sand core morphologies after sintering with different water glass dilution ratios

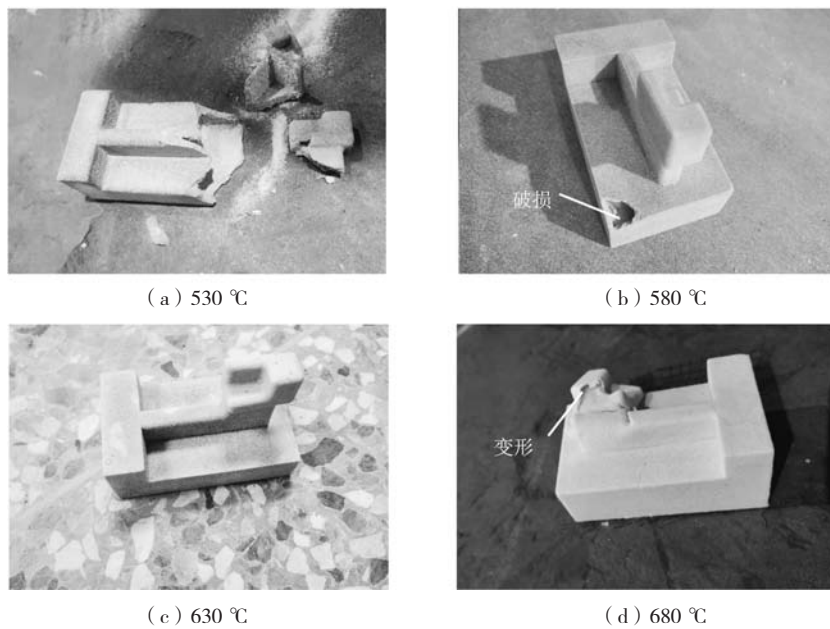


图4 不同温度上限砂芯形貌图

Fig. 4 Sand core morphologies with different upper temperature limits

的软化点，只需提高第一阶段焙烧温度，加快水分蒸发，减少水分对水玻璃的破坏程度。

将水玻璃处理后的砂芯短暂浸渗硅溶胶，擦拭表面残余硅溶胶，迅速放入炉中进行焙烧处理。焙烧工艺为一阶段300 °C保温60 min，二阶段600 °C保温60 min，三阶段850 °C保温60 min，随后炉冷至300 °C以下出炉空冷。经过硅溶胶浸渗、焙烧后的砂芯如图5所示。



图5 硅溶胶浸渗、焙烧后砂芯形貌

Fig. 5 Sand core morphology after silica sol impregnation and calcination

从图5中可以看出,砂芯经一次水玻璃浸渗、焙烧后,有机粘结剂部分挥发时残留的灰褐色,转变为纯白色。砂芯表面无裂纹,成形完整,无明显变形,为

了检验砂芯改性处理后的尺寸精度,采用三维尺寸扫描技术进行尺寸对比。改性砂芯与数模尺寸对比结果如图6所示,可以看出,在底座上表面、横筋、侧边筋

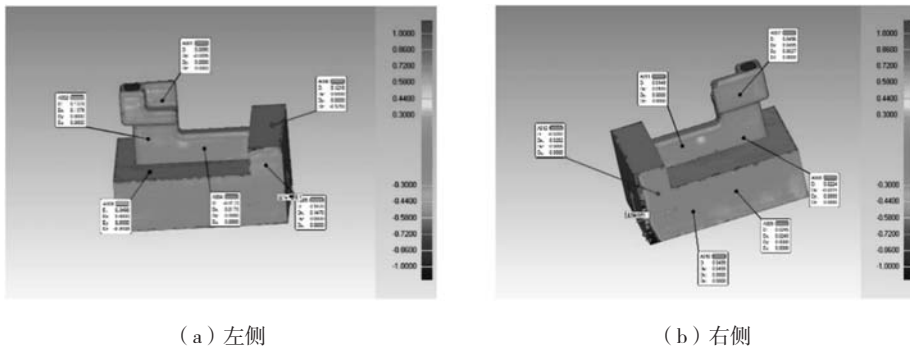


图6 改性处理后砂芯尺寸对比结果

Fig. 6 Comparison results of the sand core size after modification treatment

与芯头处,砂芯的尺寸偏差不超过0.3 mm。

各个阶段同批次处理的试样与八字块强度检测结果如表1所示。表中二次烧结为模拟砂芯表面涂敷耐火涂层后的焙烧过程,焙烧工艺为850 °C保温120 min。可以看出,无机粘结剂的浸渗、烧结可以很大程度地提高砂芯的强度,但水玻璃二次烧结后的抗弯强度与抗拉强度仅有1.17 MPa、0.16 MPa,远低于初始砂芯强度值。经过硅溶胶浸渗烧结后,砂芯二次烧结后的抗弯强度与抗拉强度提高到5.02 MPa、1.68 MPa,抗弯强度高于初始砂芯,抗拉强度达到初始砂芯的85%。结果表明,硅溶胶的浸渗、烧结达到了预期效果,使砂芯在反复烧结后仍具有较高强度,满足钛合金真空离心浇注所需要型芯强度。

表1 各阶段砂芯处理后强度
Table 1 Strengths of the sand core after treatment at each stage

项目	抗弯强度/MPa	抗拉强度/MPa
初始砂芯	4.17	1.97
浸渗水玻璃烧结	15	5
浸渗水玻璃二次烧结	1.17	0.16
浸渗硅溶胶烧结	10.43	3.08
浸渗硅溶胶二次烧结	5.02	1.68

3 实际验证

将所制备砂芯进行表面耐火涂层涂敷,耐火骨料选取高温惰性最为优异的氧化钇,粘结剂为二醋酸锆,粉液比为2:1,并加入少许助剂调节涂料性能。使用毛刷在砂芯表面刷涂两次即可,涂层干燥后将砂芯放入850 °C真空焙烧炉中,保温2 h后,即可进行实际生产浇注。如图7所示,采用石墨型与砂芯相结合的

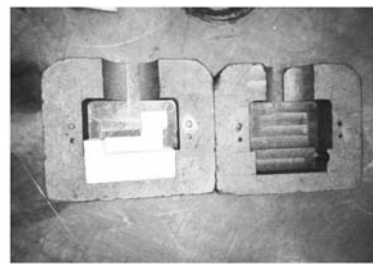


图7 砂芯与石墨型组型图

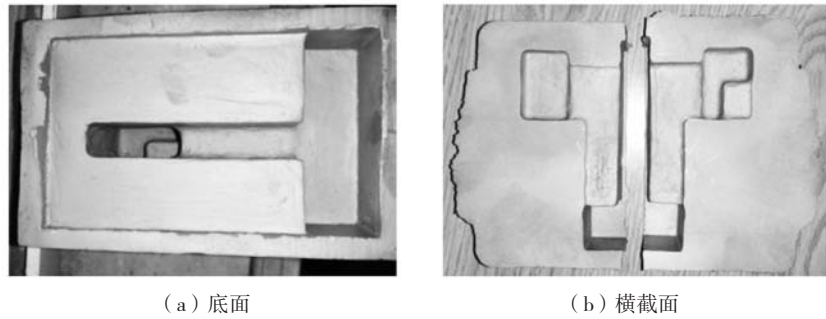
Fig. 7 Assembly diagram of the sand core and graphite type

方式进行浇注,将底座完全卡在石墨型中。原料选取为纯钛,使用真空自耗电极炉进行熔炼,离心转速为180 r/min,一炉双件。

浇注后试样切去冒口,砂芯通过水的浸透便可迅速溃散。使用线切割从试样中间部位切割,以便于观察铸件内表面形貌。整体结构如图8所示。可以看出,试样表面经喷砂后,无明显的粘砂现象,内腔成形完整。铸件表面有少许流痕存在,此为砂芯表面刷涂涂层时的刷痕,后续可以通过喷涂或者涂层干燥后细砂纸打磨加以改善。

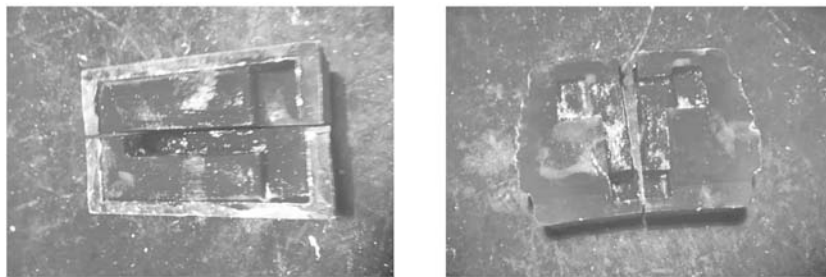
图9为砂芯浇注试样的荧光检测结果,可以看出,砂芯成形表面无明显的线性缺陷,砂芯成形表面在喷砂后无明显微裂纹存在,表面质量高。

通过电子扫描显微镜对试样喷砂前后的表面显微形貌进行观察,如图10所示。可以看出,喷砂前试样内表面污染层较厚,且表面有些许的起伏,说明涂层材料与钛液发生了化学反应,但反应层厚度在20 μm以内,表明耐火涂层起到了很好地隔绝作用,砂芯内的无机粘结剂与硅砂没有与钛液直接发生反应。经过喷砂处理后,试样表面区域平整,表面已经没有明显污染层。对于封闭式内腔结构也可采用适度的酸洗进行脱芯后的表面处理。



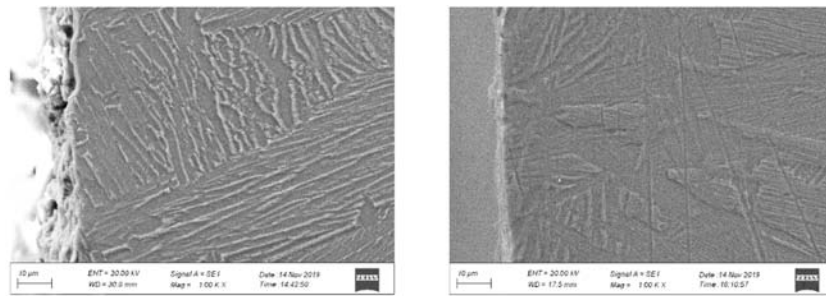
(a) 底面

(b) 横截面

图8 砂芯浇注试样
Fig. 8 Sand core casting sample

(a) 底面

(b) 横截面

图9 砂芯浇注试样荧光检测结果
Fig. 9 Fluorescence detection results of the sand core casting sample

(a) 喷砂前

(b) 喷砂后

图10 砂芯浇注试样表面微观形貌
Fig. 10 The surface micromorphologies of the sand core casting samples

4 结论

(1) 当水玻璃与水稀释比为1:3, 焙烧工艺为150℃保温60 min后, 升温至630℃保温60 min, 一次浸渗烧结后, 砂芯无破损、开裂、变形等缺陷, 成形完整。

(2) 经过两次无机粘结剂的浸渗、焙烧处理后,

得到的砂芯抗拉强度为3.08 MPa, 抗弯强度为10.43 MPa, 尺寸偏差不超过0.3 mm。且在涂敷耐火涂层后, 浇注后的铸件脱芯能力强, 封闭内腔中无明显粘砂现象, 成形表面平整光滑, 无明显荧光缺陷, 污染层厚度小于20 μm。

参考文献:

- [1] 姜延亮, 刘鸿羽, 马志毅, 等. 钛合金金属型铸造工艺研究 [J]. 铸造, 2016, 65 (5): 454-458.
- [2] 董文博. TA15钛合金金属铸型涂层制备的研究 [C]//2019年第九届全国地方机械工程学会学术年会, 郑州, 2019.
- [3] 曲银辉, 杨志刚, 林霖, 等. 3D打印砂芯在大型铝合金铸件中的应用 [C]//2020中国铸造活动周, 合肥, 2020.
- [4] 倪允强, 王佳, 陈秀明, 等. 基于砂型3D打印技术的气缸体快速铸造工艺开发 [J]. 铸造, 2019, 68 (8): 911-915.
- [5] 王涛亮, 李万印, 杨莹, 等. 钛合金砂型铸造工艺研究 [J]. 铸造技术, 2019, 40 (12): 1294-1297.
- [6] 肖强伟, 范世玺, 纪志军, 等. 大型钛合金泵体的特种砂型铸造工艺研究 [J]. 精密成形工程, 2018, 10 (3): 60-64.
- [7] 戴志成. 硅化物的生产与应用 [M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1994.

Research on Modification Process of Sand Core of Support Base for Titanium Alloy Casting

LI Chong-yang¹, BAI Zhi-yu², LIU Shi-bing¹, HAN Peng-jiang³, DIAO Yun-feng³, LI Hong-ju¹, LI Xin-qi¹

(1. Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., CAM, National Key Laboratory of Advanced Casting Technologies, Shenyang 110022, Liaoning, China; 2. Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China; 3. Military Representative Office of the Air Force Equipment Department in Liaoyang, Liaoyang 111000, Liaoning, China)

Abstract:

By analyzing the limitations of support base core prepared with conventional materials in production, a new modification process of 3D printed sand core applying to titanium alloy casting was proposed. With infiltrated and roasted twice, the sand core had a good combination of the strength and dimension accuracy, as well as the excellent removal ability. The production practice has proved that the castings exhibited a good surface quality with a thin contamination layer (<20 μm) and no obvious linear defect.

Key words:

titanium alloy; support base core; 3D printing sand core; inorganic binder