

基于 SLS 技术的钛合金铸造用砂型的尺寸精度及传递规律研究

黎阳¹, 徐志锋¹, 张守银¹, 肖强伟², 李政勋¹, 李 琿¹

(1. 南昌航空大学轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室, 江西南昌 330063;

2. 北京航空材料研究院股份有限公司, 北京 100095)

摘要: 结合SLS技术和钛合金砂型铸造, 采用酚醛树脂覆膜宝珠砂+7wt.%磷酸盐粉末的双组分粘结剂型砂, 混合均匀后进行SLS成形、低温焙烧和高温焙烧制备钛合金铸造用砂型。主要研究制备钛合金铸造用砂型主要工序阶段的X、Y、Z向尺寸变化与尺寸传递规律, 并浇注钛合金铸件进行验证。结果表明, 砂型在SLS成形及低温焙烧过程中尺寸变化小, 其尺寸变化集中在高温焙烧过程中。砂型经高温焙烧后, 其X、Y向尺寸偏差为-1.37~0.09 mm, Z向尺寸偏差为-3.18~0.55 mm。采用该工艺制备钛合金铸造用砂型, 得到的阶梯砂型表面质量好, 无裂纹和翘曲变形等缺陷, 并进行了TC4钛合金的铸造试验, 得到表面质量较好的钛合金铸件, 尺寸精度为DCTG10级要求。

关键词: 钛合金砂型铸造; 选区激光烧结; 尺寸传递规律; 尺寸精度

作者简介:

黎阳(1999-), 男, 硕士生, 主要研究方向为钛合金砂型铸造。E-mail: 2420368542@qq.com

通信作者:

徐志锋, 男, 教授, 硕士生导师, 电话: 13879136687, E-mail: xuzhf@nchu.edu.cn

中图分类号: TG242

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)08-1127-11

基金项目:

国家自然科学基金(52165018)。

收稿日期:

2024-10-31 收到初稿,
2024-12-30 收到修订稿。

钛及钛合金因比强度高、密度低、抗高温氧化能力强和较好的耐腐蚀等性能, 广受航空航天、国防工业和医疗领域的青睐^[1-3]。随着上述领域的不断发展, 由钛合金构成的主要零件的尺寸精度要求也不断提高。

目前, 常用的钛合金铸造工艺包括熔模铸造、石墨型铸造、金属型铸造和砂型铸造等, 都有各自的优缺点。钛合金砂型铸造相比于其他工艺具有很明显的成本优势, 且能快速制备铸件, 具有取代部分精密铸造的潜力。但对于结构较为复杂的铸型, 尤其是含有复杂异形砂芯的情况下, 目前还难以用传统砂型铸造工艺进行制备, 主要在于无法保证其尺寸精度, 这限制了钛合金砂型铸造的发展。而将3D打印制备复杂砂型(芯)技术应用在钛合金铸造中, 是解决上述难题的有效途径。此外, 由于熔融钛化学活性非常大, 极易与各种耐火材料甚至氮气产生不同程度的交互反应, 导致钛铸件表面产生较厚的反应层, 且容易造成铸件气孔、表面裂纹、夹杂等缺陷^[4-5]。因此砂型(芯)必须进行高温焙烧, 除去铸型内水分、有机物及有害气体等, 这便要求砂型(芯)在高温焙烧后仍能保持一定强度以及尺寸精度。

3D打印技术在复杂结构铸件生产中, 具有外观质量好、尺寸精度高、生产流程少和试制周期短等优点, 可以预见3D打印技术将在铸造领域有广阔应用前景^[6-7]。在制备汽车发动机缸盖^[8-9]、排气管^[10]等铸件的砂型整体成形方面表现出极大的优越性, 且对于提升航空航天^[11]等工业领域的快速响应能力和制造水平有着重要意义^[12]。肖强伟^[13]、李琿^[14]等进行了基于3D打印的钛合金铸造用砂型砂芯的制备工艺研究, 成功铸造出了合格的钛合金铸件。已有的钛合金砂型铸造研究主要围绕砂型及钛合金铸件力学性能和钛合金铸件界面反应情况展开, 而没有对砂型的尺寸精度及传递规律进行研究。钛合金铸造用砂型(芯)在SLS成型、低温焙烧、高温焙烧工序中极易出现尺寸变化及几何形状的缺陷, 极大限制了相关研究的开展及后续工程化应用的推广。

本课题拟针对钛合金砂型铸造的尺寸超差问题, 主要研究钛合金砂型铸造关

键工序实施过程中铸型的尺寸变化与传递规律以及铸型在低温焙烧及高温焙烧过程中存在粘结剂的显微组织和物相演变, 揭示其关键工序中尺寸变化的形成机制, 并建立相应的数学模型。

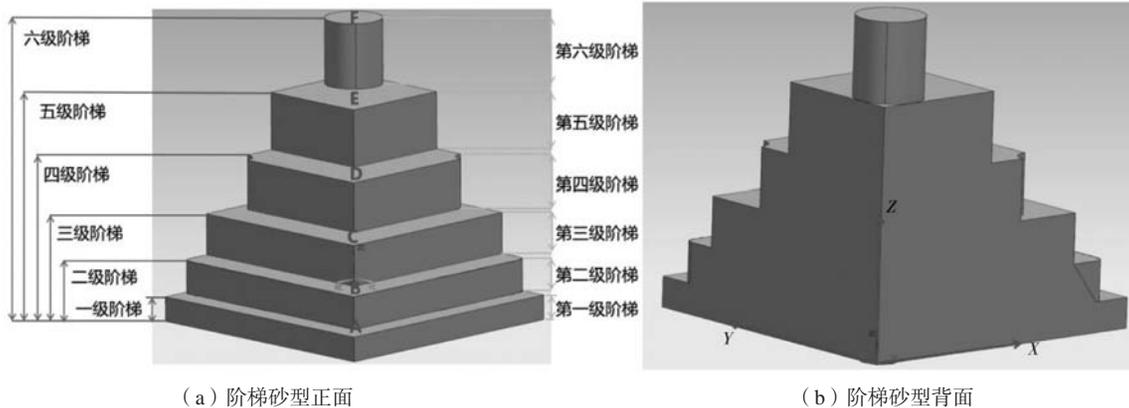
1 试验方法

试验材料有覆膜熔融陶瓷砂、磷酸盐粉末以及TC4 (Ti6Al4V) 合金等; 试验设备为AFS-5300激光成形机、PD-MT17箱式电阻炉和FREESCAN-UE11型3D扫

描仪等。

本试验设计了六级阶梯模型, 其外形最大尺寸为160 mm × 160 mm × 165 mm, 结构如图1所示, 尺寸如图2所示。在试验中测量A~F所在位置的X、Y、Z向尺寸平均值, 如序号C的X、Y向尺寸为第三级阶梯的X、Y向尺寸, Z向尺寸为三级阶梯的总高Z向尺寸; 其中F号位置的X、Y向尺寸为圆柱体的直径; 测试序号的位置如图1所示。

具体砂型模型尺寸如表1所示。

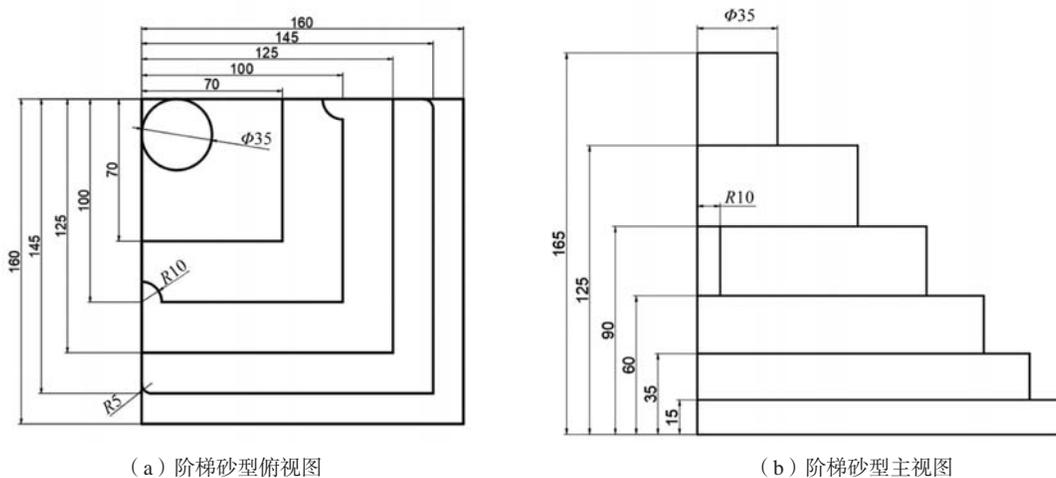


(a) 阶梯砂型正面

(b) 阶梯砂型背面

图1 阶梯砂型的CAD模型及其测量位置

Fig. 1 CAD models of stepped sand pattern and its measurement positions



(a) 阶梯砂型俯视图

(b) 阶梯砂型主视图

图2 阶梯砂型二维图

Fig. 2 2D Diagram of Stepped Sand Pattern

表1 阶梯砂型各测试位置的尺寸平均值
Tab. 1 Mean values of dimensions for each test position of the stepped sand pattern mm

方向	位置					
	A	B	C	D	E	F
X	160	145	125	100	70	35
Y	160	145	125	100	70	35
Z	15	35	60	90	125	165

拟浇注一长为100 mm, 宽为40 mm, 厚度分别为25 mm、20 mm、15 mm、10 mm、5 mm, 每一级阶梯高度皆为20 mm的六级阶梯铸件进行验证, 铸件具体尺寸如图3所示。将钛合金铸件的横浇道切掉后, 根据钛合金阶梯结构的对称性, 切割钛合金铸件的一半进行三维数据的扫描, 如图4所示, 分析钛合金铸件的尺寸变化情况。

用FREESCAN-UE11型3D扫描仪对砂型以及钛

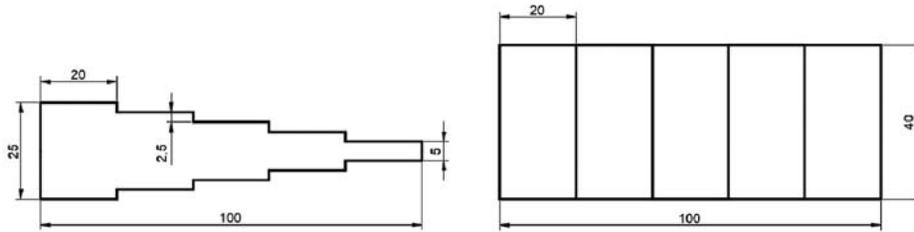


图3 阶梯结构钛合金铸件图

Fig. 3 Diagram of titanium alloy casting with step structure

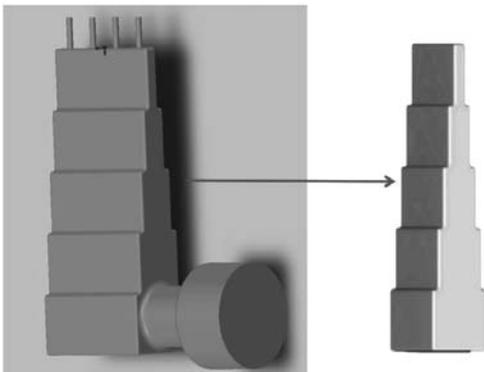


图4 阶梯结构钛合金铸件及三维扫描对比所需模型

Fig. 4 Step-structured titanium alloy casting and model required for 3D scanning comparison

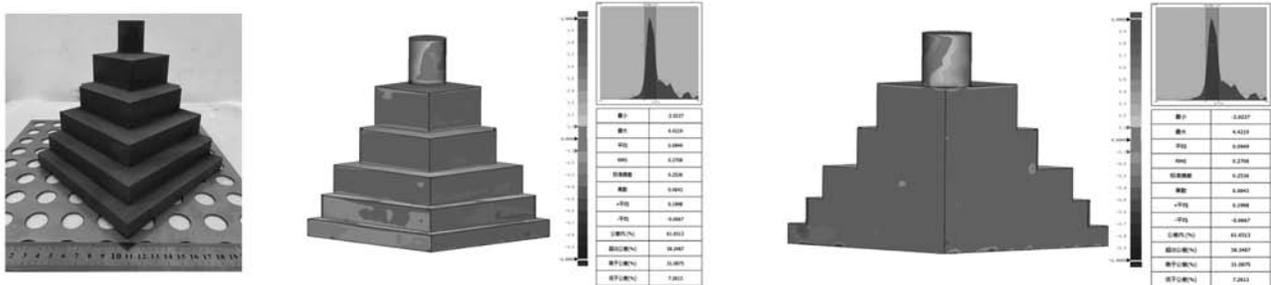
合金铸件进行扫描。将扫描数据导入软件Geomagic Control X中，再导入对应砂型的STP格式文件。首先

将原始数据模型作为参照；其次使用该软件的“最佳拟合对齐”将砂型的扫描数据模型和原始数据模型进行对齐；最后选择“3D比较”，进行扫描数据与原始数据的尺寸偏差分析。通过钨灯丝扫描电子显微镜观察砂型截面的断面形貌，重点观察两种工艺下高温焙烧前后砂型树脂膜的熔融状态，以及颗粒间的粘结状态。

2 试验结果与分析

2.1 砂型 SLS 成形后的尺寸变化及传递规律

在AFS-5300型激光成形机中，以激光功率48 W、加热温度55 ℃、粉层厚度0.2 mm、扫描线速度2.9 m/s的选区激光烧结工艺参数进行砂型的制备，得到的砂型如图5（a）所示。对SLS成形后的砂型进行三维扫描及数据对比，得到的结果如图5（b）和（c）所示。



(a) SLS成形砂型

(b) 砂型正面三维尺寸对比结果图

(c) 砂型背面三维尺寸对比结果图

图5 SLS成形砂型及其三维尺寸对比结果图

Fig. 5 SLS-formed sand mold and its 3D dimension comparison result diagram

由图5（b）和（c）可知，砂型平均正尺寸偏差为0.199 8 mm，平均负尺寸偏差为-0.066 7 mm，整体为正偏差，平均尺寸偏差为0.094 9 mm。砂型整体尺寸偏差较小，尺寸偏差为±0.1 mm，砂型X、Y方向的尺寸偏差基本一致。砂型正面可直观看出尺寸的变化，第一、二级阶梯X、Y向尺寸偏差在0.1~0.3 mm，随尺寸的减小，尺寸偏差也随之减小到±0.1 mm；Z向尺寸都是正偏差，在一、二级阶梯中，Z向尺寸较小，但尺寸偏差在0.3~0.5 mm之间，尺寸变化率较大，这是因

为激光烧结过程中存在“Z轴盈余”，使Z向尺寸较小时，尺寸变化率较大，随Z向尺寸的增大，尺寸偏差也随之增大，但尺寸变化率减小。砂型中的圆柱体朝Y轴的负方向偏移0.2 mm，且这一平面的Z方向尺寸有明显偏大，这是由于在这一打印平面内，打印图形由方形变为圆形，激光线扫的长度不断变化，导致尺寸精度有所变化。激光烧结时产生的热量使圆形外的砂粒粘结在圆形周围，其他阶梯连接处也存在粘砂现象，圆柱体的整体尺寸偏差在-0.2~0.3 mm之间，比方形阶

梯的尺寸变化大。砂型背面区域尺寸偏差在 ± 0.1 mm 之间, 砂型的整体成形完整, 尺寸精度高, 砂型的边缘、倒角等部位轮廓清晰。对图5(a)所示的砂型进

行尺寸的测量, 测量位置如图1所示, 测试位置尺寸平均值如表2所示。

SLS成形后的砂型相对于CAD模型

表2 砂型各测试位置的尺寸平均值
Tab. 2 Mean values of dimensions of sand molds at each test position

方向	位置					
	A	B	C	D	E	F
X	160+0.30	145+0.26	125+0.25	100+0.23	70+0.25	35+0.39
Y	160+0.08	145+0.08	125+0.03	100+0.12	70+0.16	35+0.24
Z	15+0.33	35+0.41	60+0.53	90+0.62	125+0.61	165+0.72

率, 采用式(1)计算:

$$\alpha_1 = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: α_1 为SLS成形后的砂型相对于CAD模型

的尺寸变化率, %; L_1 为SLS成形后的砂型尺寸, mm; L_0 为CAD模型的尺寸, mm。

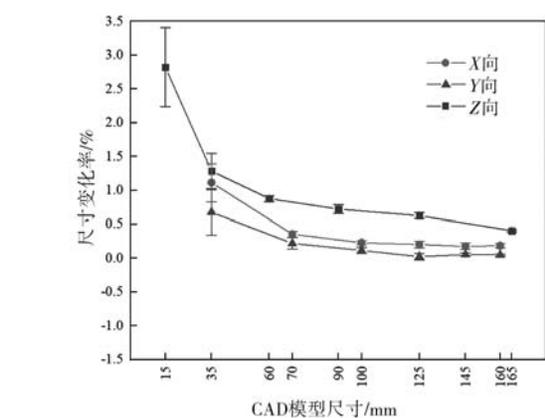


图6 砂型相对于CAD模型

Fig. 6 Rate of dimensional change of the sand pattern with respect to the CAD model

从图6中可知, SLS成形后的砂型X、Y、Z方向的尺寸都是正偏差, 尺寸变化率随尺寸的增大逐渐减小。随着尺寸的增大, X、Y向尺寸变化率保持着较小的变化趋势, 始终为正偏差; 而Z向尺寸的变化率较大, 由2.22%减小到0.44%。这表明Z向尺寸对SLS成形后的砂型尺寸相对误差有很大影响。当Z向尺寸较小时, 激光完成第一层砂料的烧结之后, 由于粉床与第一烧结层的温度差引起该层发生的翘曲变形, 同时由于次级烧结的作用, 使得砂型尺寸膨胀大于烧结收缩, 在宏观上表现为尺寸增大。随着Z向尺寸进一步增

大, 砂型的尺寸变化率变小趋势明显。这是因为当砂型的Z向尺寸较大时, 翘曲变形与次级烧结现象的影响并不明显, 砂型此时主要受烧结收缩的影响, 使得Z向偏差进一步缩小。当Z向尺寸小于90 mm时, Z向尺寸变化率呈现较大变化, 由2.22%减小至0.69%, 而当Z向尺寸大于90 mm时, Z向尺寸变化率则平缓许多。这表明当CAD模型Z向尺寸小于90 mm时, Z向尺寸对尺寸变化率的影响增大, 而当CAD模型Z向尺寸大于90 mm时, Z向尺寸对尺寸变化率的影响有所降低。X向与Y向尺寸变化率一致, Y向变化率较X向变化率更平缓, 也随尺寸的增大而减小, 整体为膨胀, 其中X向尺寸变化率由1.11%变为0.19%, Y向尺寸变化率由0.68%变为0.05%。

通过对SLS成形后的砂型相对于CAD模型的X、Y、Z三个方向的尺寸变化率曲线进行拟合, 得到X、Y、Z向尺寸传递规律为式(2)、(3)和(4):

X向尺寸传递规律为:

$$L_{1X} = 0.3435 + 0.9994L_0 \quad (2)$$

Y向尺寸传递规律为:

$$L_{1Y} = 0.2642 + 0.9986L_0 \quad (3)$$

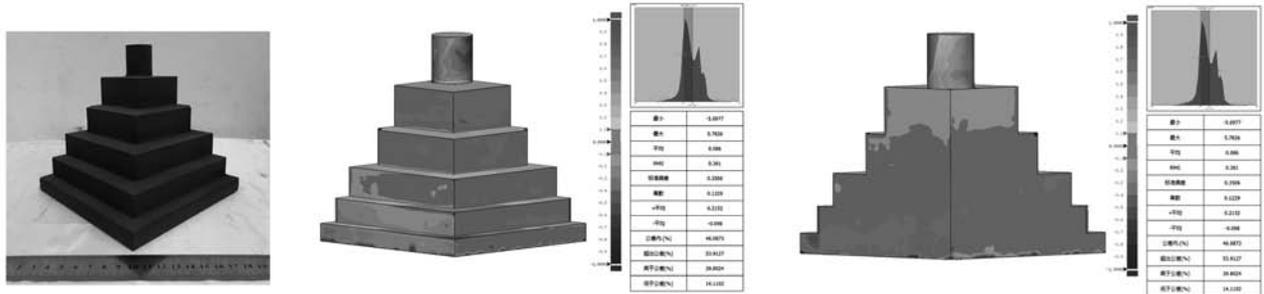
Z向尺寸传递规律为:

$$L_{1Z} = 0.3475 + 1.0024L_0 \quad (4)$$

2.2 砂型低温焙烧后的尺寸变化及传递规律

用玻璃微珠填埋砂型, 放入鼓风对流干燥箱中升温固化, 固化温度达到170 °C后保温2 h, 炉冷至室温取出。得到的砂型如图7(a)所示。对低温焙烧后的砂型进行三维扫描及数据比较, 得到的结果如图7(b)和(c)所示。

由图7(b)和(c)可知, 砂型经低温焙烧后, 其平均正尺寸偏差为0.215 2 mm, 平均负尺寸偏差为-0.098 mm, 整体为正偏差, 平均尺寸偏差为0.086 mm。从砂型正面可看出: 第一、二级阶梯的X向有稍许膨胀, 尺寸变化为0.1~0.5 mm, 而Y向尺寸偏



(a) 低温焙烧后的砂型 (b) 低温焙烧砂型正面三维尺寸对比结果图 (c) 低温焙烧砂型背面三维尺寸对比结果图

图7 低温焙烧砂型及其三维尺寸对比结果图

Fig. 7 The low-temperature roasted sand pattern and its 3D dimension comparison results

差在 ± 0.1 mm 之间，随尺寸减小，砂型出现负偏差，第五、六级阶梯 X、Y 向尺寸偏差在 -0.1~0.3 mm 之间。从砂型背面可看出：大部分区域尺寸偏差为 ± 0.1 mm，但砂型底部 Y 向出现收缩，尺寸偏差在 -0.1~-0.3 mm 之间，而底部 X 向出现局部的膨胀，第二、三、四级阶梯背面尺寸偏差在 ± 0.1 mm 之间，而第五、六级阶梯背面开始出现膨胀，尺寸偏差在 0.1~0.3 mm 之间，且圆柱愈发朝 Y 轴负方向偏移。砂型整体的 X、Y 向尺寸变化较

为一致，之所以出现底部的第一、二级阶梯与顶部的第五、六级阶梯 X、Y 向尺寸变化不一致，是因为在低温焙烧过程中填充材料为玻璃微珠，能有效预防砂型出现翘曲变形、开裂等缺陷，但无法彻底防止变形。砂型的整体成形完整，砂型的边缘、倒角等部位轮廓清晰。对低温焙烧后的砂型进行尺寸的测量，测试位置尺寸平均值如表 3 所示。

砂型经低温焙烧后相对于 CAD 模型 的尺寸变化

表 3 低温焙烧砂型的尺寸平均值
Tab. 3 Average dimensional values of low temperature roasted sand patterns

方向	位置					
	A	B	C	D	E	F
X	160+0.56	145+0.43	125+0.41	100+0.40	70+0.38	35+0.48
Y	160+0.18	145+0.22	125+0.26	100+0.29	70+0.33	35+0.47
Z	15+0.39	35+0.55	60+0.36	90+0.38	125+0.49	165+0.37

率，采用式 (5) 计算：

$$\alpha_2 = \frac{L_2 - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中： α_2 为砂型经低温焙烧后相对于 CAD 模型 的尺寸变化率，%； L_2 为砂型经低温焙烧后的尺寸，mm； L_0 为 CAD 模型的尺寸，mm。

根据表 3 的数据，砂型经低温焙烧后相对于 CAD 模型 的尺寸变化率如图 8 所示。

从图 8 中可知，砂型经低温焙烧后，其 X、Y、Z 方向的尺寸都是正偏差，整体尺寸增大，尺寸变化率随尺寸的增大逐渐减小。随着尺寸的增大，X、Y 向尺寸变化率保持着较小的变化趋势，始终为正偏差；而 Z 向尺寸的变化率较大，由 2.60% 减小到 0.23%。X 向与 Y 向尺寸变化率一致，也随尺寸的增大而减小，其中 X 向尺寸变化率具体由 1.38% 变为 0.15%，Y 向尺寸变化率具体由 1.33% 变为 0.11%。

图 9 为低温焙烧后砂型断口形貌，可以看出，低温

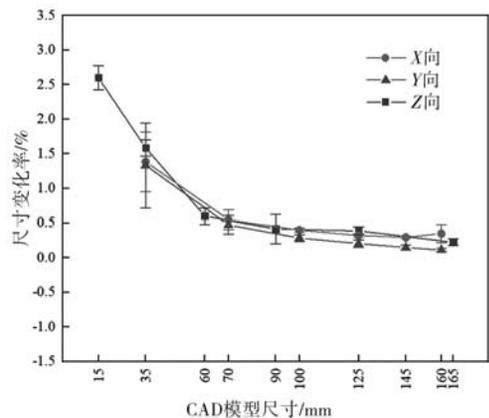


图 8 焙烧砂型相对于 CAD 模型 的尺寸变化率

Fig. 8 Rate of dimensional change of low-temperature roasted sand patterns with respect to CAD models

焙烧后的砂粒表面包裹着一层光滑的树脂膜，在低温焙烧升温过程中，砂粒表面上的酚醛树脂熔融后发生

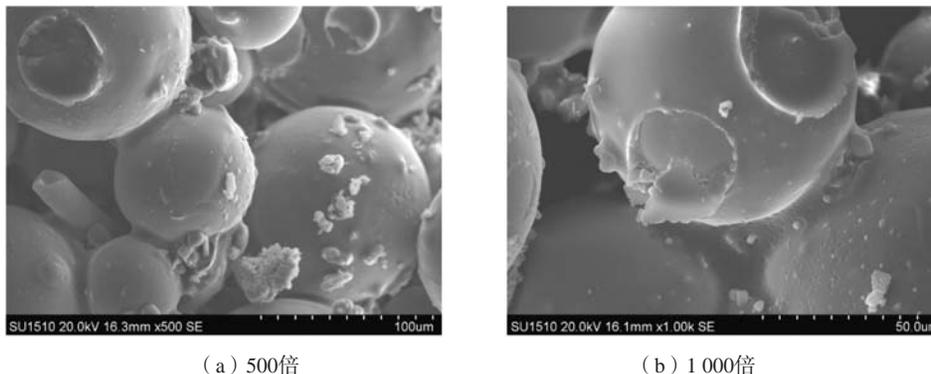


图9 不同放大倍数下低温焙烧砂型断面形貌

Fig. 9 Fracture morphologies of low-temperature roasted sand pattern under different magnifications

液态流动并与相邻颗粒表面层的树脂膜发生粘结，树脂膜之间软化接触形成树脂膜“粘结桥”。当温度降为室温，酚醛树脂从熔融状态转变为到固化状态后产生收缩，但磷酸盐的分解温度高于低温焙烧温度，并未受热分解，从而填充进树脂收缩产生的空隙中，使得低温焙烧后的砂型整体相对于SLS成形后的砂型并未产生较大的尺寸变化。

通过对低温焙烧后相对于CAD模型的X、Y、Z三个方向尺寸变化率曲线进行拟合，得到X、Y、Z向尺寸传递规律为式(6)、(7)和(8)，如下：

X向传递规律为：

$$L_{2X} = -0.3952 + 1.0005L_0 \quad (6)$$

Y向传递规律为：

$$L_{2Y} = -0.5139 + 0.9979L_0 \quad (7)$$

Z向传递规律为：

$$L_{2Z} = -0.4450 + 0.9997L_0 \quad (8)$$

2.3 砂型高温焙烧后的尺寸变化及传递规律

用莫来石填埋低温焙烧后的砂型，放入箱式电阻炉中进行高温焙烧，最高焙烧温度达到1 050 ℃后保温5 h，炉冷至室温后取出。得到的砂型如图10(a)所示，对高温焙烧后的砂型进行三维扫描及数据比较，得到的结果如图10(b)和(c)所示。

由图10(b)和(c)可知，砂型经高温焙烧后，平均正尺寸偏差为0.200 8 mm，平均负尺寸偏差为-0.809 4 mm，整体为负偏差，平均尺寸偏差为-0.601 4 mm。从砂型正面可看出：砂型的X、Y向尺寸均出现负偏差，尺寸偏差在-0.3~-1.4 mm之间，随尺寸的减小，尺寸偏差也随之减小，而在第一、二级阶梯的Z向尺寸上，砂型的部分区域出现了尺寸正偏差。这可能是在高温焙烧过程中，砂粒之间的树脂粘结桥发生断裂，砂粒出现了颗粒重排，部分砂粒聚集在一起，导致砂型的Z向小尺寸出现了正偏差。从砂型背面

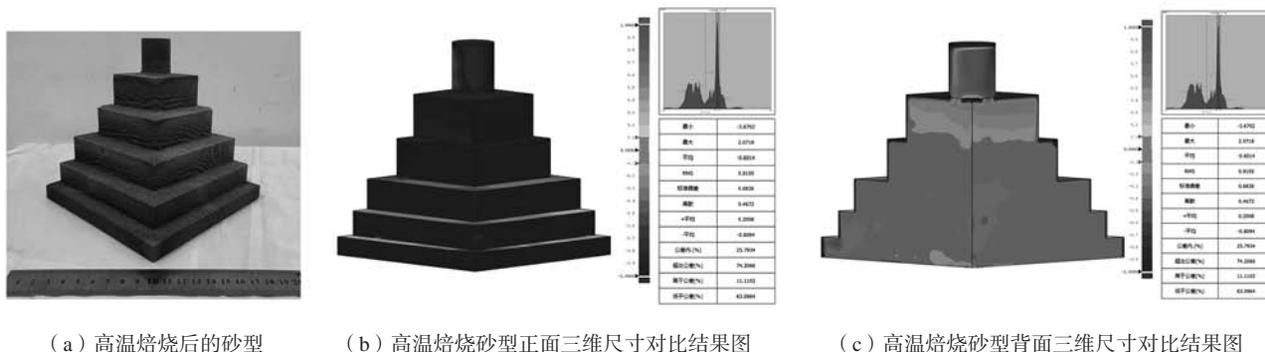


图10 高温焙烧砂型及其三维尺寸对比结果图

Fig.10 The high-temperature baked sand pattern and its 3D dimension comparison results

可看出：大部分区域尺寸偏差在±0.1 mm之间，而第五、六级阶梯背面出现了膨胀，尺寸偏差在0.1~0.6 mm之间。砂型整体的X、Y向尺寸变化基本一致。高温焙烧后，砂型的整体成形完整，砂型的边缘、倒角等部

位轮廓清晰。

对高温焙烧后的砂型进行尺寸的测量，测试位置尺寸平均值如表4所示。

砂型经高温焙烧后相对于CAD模型尺寸变化

表4 高温焙烧砂型的平均尺寸值
Tab. 4 Average dimensional values of high-temperature baked sand patterns

方向	位置					
	A	B	C	D	E	F
X	160-1.33	145-1.22	125-1.01	100-0.63	70-0.31	35+0.07
Y	160-1.37	145-1.08	125-1.03	100-0.84	70-0.42	35+0.09
Z	15+0.19	35+0.08	60-0.67	90-1.42	125-2.18	165-3.18

率，采用式(9)计算：

$$\alpha_3 = \frac{L_3 - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (9)$$

式中： α_3 为砂型经高温焙烧后相对于CAD模型的尺寸变化率，%； L_3 为砂型经高温焙烧后的尺寸，mm； L_0 为CAD模型的尺寸，mm。

根据表4的数据，砂型经高温焙烧后相对于CAD模型的尺寸变化率如图11所示。

从图11中可知，X、Y、Z方向的尺寸变化率随尺寸的增大逐渐减小，且由开始的正变化率变为为了

负变化率。X、Y向尺寸变化率较小，其中X向尺寸变化率由0.21%变为-0.83%，Y向尺寸变化率由0.26%变为-0.85%；而Z向尺寸的变化率较大，由1.29%减小到-1.93%。X向与Y向尺寸变化率一致，也随尺寸的增大而减小，整体为膨胀，其中X向尺寸变化率具体由1.38%变为0.15%，Y向尺寸变化率具体由1.33%变为0.11%。

图12为高温焙烧后砂型断口形貌，可以看出，高温焙烧后，砂粒与砂粒之间的“高温烧颈”代替了原位的树脂膜“粘结桥”。将焙烧前后的双组分覆膜砂砂型进行XRD分析，结果如图13所示。经过高温焙烧后，覆膜砂内部发生了相变反应，出现了莫来石，硅线石、磷酸铝以及二氧化硅（磷石英）等产物。随温度的升高，覆膜砂中有机粘结剂酚醛树脂会彻底分解，留下大量孔隙，同时无机粘结剂磷酸盐分解产生的 P_2O_5 在高温下与覆膜砂的主要成分 Al_2O_3 反应生成 $AlPO_4$ ，填补酚醛树脂被烧蚀后留下的孔隙，但砂型整体状态表现为收缩。

通过对高温焙烧后相对于CAD模型的X、Y、Z三个方向尺寸变化率曲线进行拟合，得到X、Y、Z向尺寸传递规律为式(10)、(11)和(12)：

X向尺寸传递规律为：

$$L_{3x} = 0.4872 + 0.9884L_0 \quad (10)$$

Y向尺寸传递规律为：

$$L_{3y} = 0.3872 + 0.9890L_0 \quad (11)$$

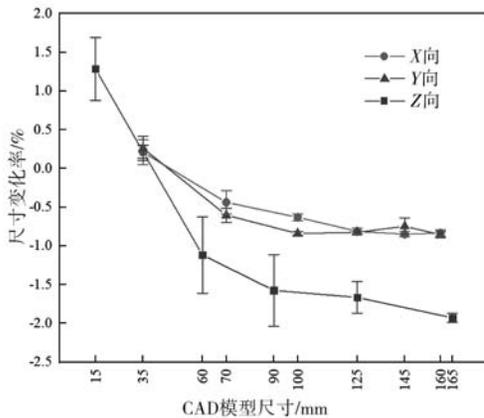
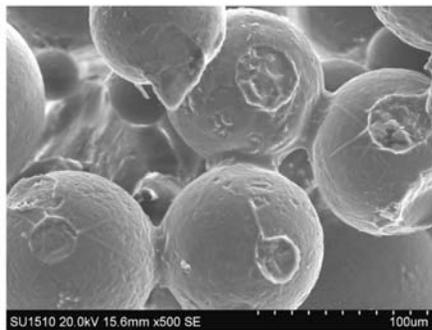
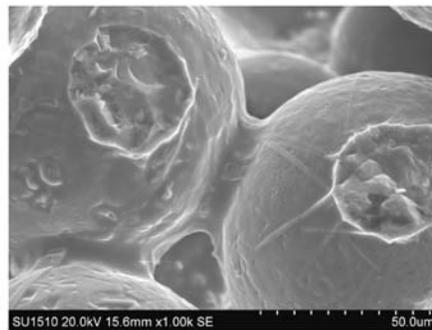


图11 高温焙烧砂型相对于CAD模型的尺寸变化率
Fig. 11 Rates of dimensional changes of high-temperature baked sand molds versus CAD models



(a) 500倍



(b) 1000倍

图12 不同放大倍数下高温焙烧砂型断口形貌

Fig. 12 Fracture morphologies of high-temperature roasted sand pattern under different magnifications

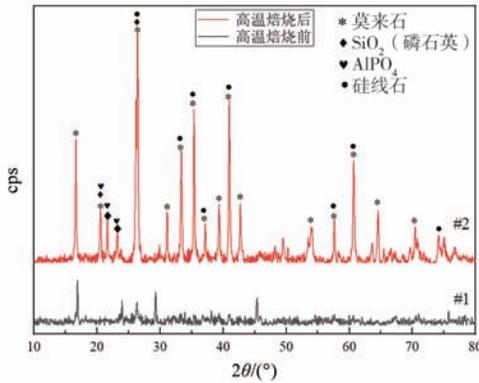


图13 双组分粘结剂覆膜砂焙烧前后XRD分析
Fig. 13 XRD analysis of two-component binder-coated sand before and after roasting

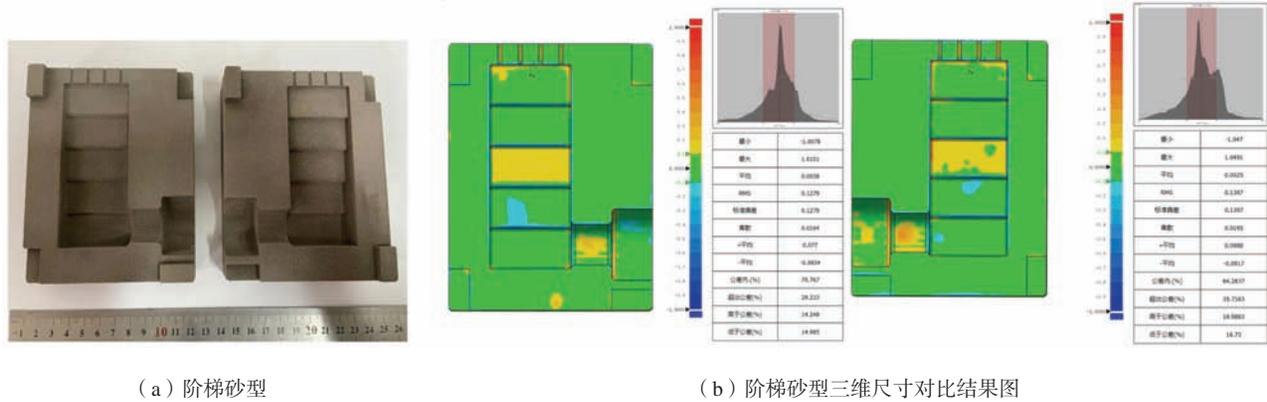
Z向尺寸传递规律为:

$$L_{3Z}=0.704 6+0.979 9L_0 \quad (12)$$

2.4 双组分粘结剂覆膜砂阶梯砂型制备钛合金铸件

在激光成形机中,以激光功率48 W、加热温度55 ℃、粉层厚度0.2 mm和扫描线速度2.9 m/s的工艺参数进行双组分粘结剂(2wt%酚醛树脂覆膜砂+7wt%磷酸盐粉末)覆膜砂阶梯砂型的制备,得到的阶梯砂型如图14(a)所示,对成形后的阶梯砂型进行三维扫描及数据对比,得到的结果如图14(b)所示。

由图14(b)可知,阶梯砂型左右半型的尺寸变化基本一致,砂型左右半型整体皆为正偏差,左右半型的平均尺寸偏差分别为0.003 8 mm和0.002 5 mm,砂型



(a) 阶梯砂型

(b) 阶梯砂型三维尺寸对比结果图

图14 阶梯砂型及其三维尺寸对比结果图

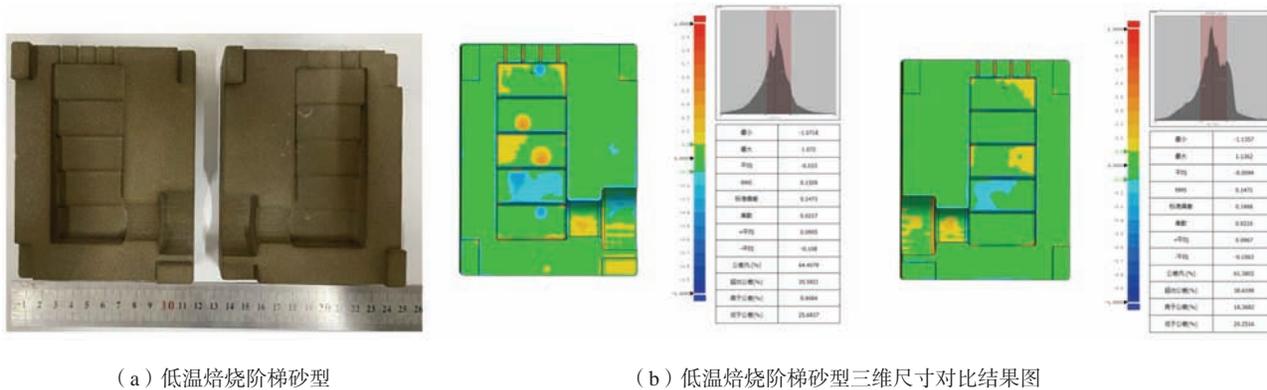
Fig. 14 The stepped sand patterns and their 3D dimension comparison results

整体的平均尺寸偏差为0.003 2 mm;砂型尺寸偏差为±0.1 mm,尺寸正偏差的地方主要分布在浇道和第三级阶梯处,砂型整体成形完整。

用玻璃微珠填充阶梯砂型,放入鼓风对流干燥箱中升温固化,固化温度达到170 ℃后保温2 h,随炉冷

却至室温取出。得到的阶梯砂型如图15(a)所示,对低温焙烧后的阶梯砂型进行三维扫描及数据对比,得到的结果如图15(b)所示。

由图15(b)可知,阶梯砂型经低温焙烧后,其左右半型的尺寸变化基本一致,砂型左右半型整体皆



(a) 低温焙烧阶梯砂型

(b) 低温焙烧阶梯砂型三维尺寸对比结果图

图15 低温焙烧阶梯砂型及其三维尺寸对比结果图

Fig. 15 The low-temperature roasted stepped sand patterns and their 3D dimension comparison results

为负偏差，左右半型的平均尺寸偏差分别为-0.033 mm和-0.009 4 mm，砂型整体的平均尺寸偏差为-0.021 2 mm；砂型尺寸偏差为±0.1 mm，产生尺寸偏差的地方主要分布在浇道和阶梯处，较SLS成形后的砂型尺寸变化不大，砂型整体成形完整。

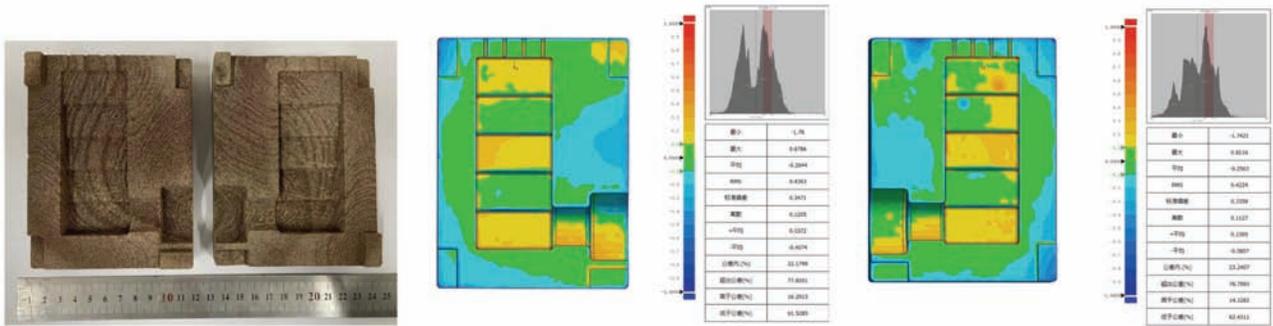
用莫来石填埋低温焙烧后的阶梯砂型，放入箱式电阻炉中进行高温焙烧，最高焙烧温度达到1 050 ℃后保温5 h，随炉冷却至室温取出。得到的阶梯砂型如图16 (a)所示，对高温焙烧后的阶梯砂型进行三维扫描及数据对比，得到的结果如图16 (b)所示。

由图16 (b)可知，砂型经高温焙烧后，其左右半型的尺寸变化基本一致，砂型左右半型整体皆为负偏差，左右半型的平均尺寸偏差分别为-0.264 4 mm和-0.256 3 mm，砂型整体的平均尺寸偏差为-0.260 4 mm；砂型尺寸偏差为±0.5 mm，整体成形完整。

将高温焙烧后的砂型涂刷氧化钇涂层并再次进行高温焙烧，随后进行钛合金浇注。钛合金浇注方案：

直浇道和横浇道均采用机加石墨材料，用钢板与螺栓将砂型固定并与直浇道、横浇道组装，并采用VC350型数字化电弧真空凝壳铸造炉进行钛合金的熔炼和浇注。

阶梯钛合金铸件经过喷丸处理后轮廓清晰、表面光亮呈银白色，但铸件表面有少量气孔存在，无明显粘砂和其他铸造缺陷，如图17 (a)所示。将钛合金铸件的横浇道切掉后，根据钛合金阶梯结构的对称性，切割掉钛合金铸件的一半，剩下的钛合金铸件如图17 (b)所示。将钛合金铸件的一半进行三维扫描及数据对比，结果如图17 (c)所示，可看出铸件整体为负偏差，平均尺寸偏差为-0.200 5 mm，当铸件厚度较小时，有局部区域存在尺寸正偏差，随厚度的增大，尺寸偏差由正偏差逐渐转为负偏差，铸件尺寸极限偏差约为±1.3 mm，满足GB/T6414-2017中DCTG10级要求。由图18可知，随着界面距离的增加，在0~10 μm中，O、Al元素含量先大幅度上升后再大幅度下降最后



(a) 高温焙烧后的阶梯砂型 (b) 高温焙烧阶梯砂型三维尺寸对比结果图

图16 高温焙烧阶梯砂型及其三维尺寸对比结果图

Fig. 16 The high-temperature baking stepped sand patterns and their 3D dimension comparison results



(a) 钛合金铸件 (b) 去除浇道后的一半阶梯钛合金铸件 (c) 一半阶梯钛合金铸件的尺寸对比结果图

图17 钛合金铸件及一半铸件的三维尺寸对比结果图

Fig. 17 The titanium alloy casting and 3D dimension comparison result diagram of half one

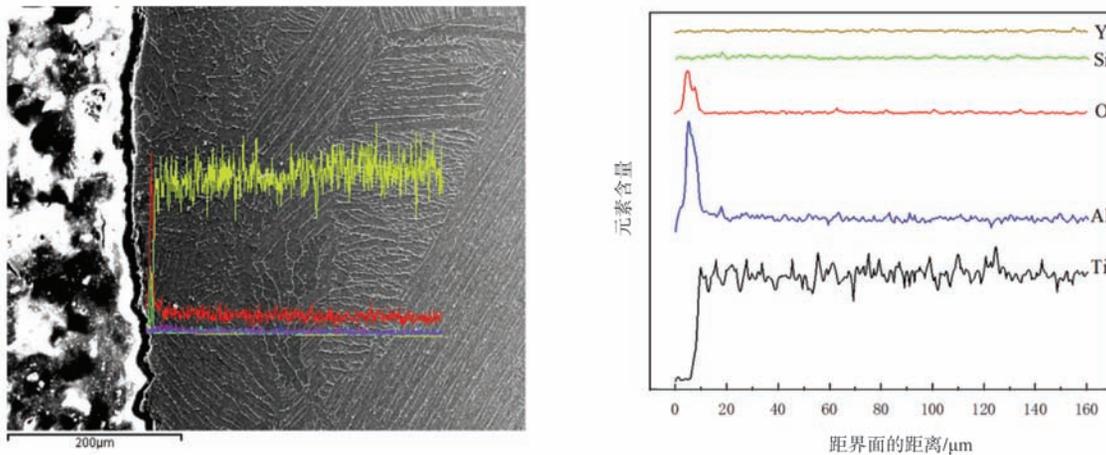


图18 15 mm处钛合金铸件元素扩散情况

Fig. 18 Diffusion situation of elements in titanium alloy casting at 15 mm depth

趋于稳定，Ti元素含量逐渐上升最后趋于稳定状态，Y、Si这三种元素含量小且很稳定。由分析可知该界面反应于0~15 μm处较为剧烈，其平均界面反应层厚小于20 μm。表明采用基于SLS制备的双组分粘结剂覆膜砂砂型可以铸造出表面质量好、尺寸精度高和界面反应层较小的钛合金铸件。

3 结论

(1) 在制备双组分粘结剂覆膜砂砂型各个工序中，砂型始终保持整体形貌完整，边缘、倒角及圆柱轮廓清晰，满足用于铸造钛合金的要求。

(2) 砂型高温焙烧后有较大的尺寸收缩。其原因主要是随温度的升高，覆膜砂中有机粘结剂酚醛树脂

会彻底分解，留下大量孔隙，同时无机粘结剂磷酸盐分解产生的 P_2O_5 在高温下与覆膜砂中的 Al_2O_3 反应生成 $AlPO_4$ ，填补树脂烧蚀留下的间隙，使砂粒之间的结构更加致密。

(3) 砂型经高温焙烧后，X、Y、Z方向的尺寸变化率随尺寸的增大逐渐减小，且由开始的正变化率变为了负变化率；其X、Y、Z向尺寸传递规律分别为： $L_{3X}=0.487 2+0.988 4L_0$ 、 $L_{3Y}=0.387 2+0.989 0L_0$ 、 $L_{3Z}=0.704 6+0.979 9L_0$ 。

(4) 采用SLS成型的双组分粘结剂砂型制备的阶梯结构钛合金铸件均外形轮廓清晰，钛合金铸件尺寸极限偏差约为 ± 1.3 mm，尺寸精度为DCTG10，界面反应层厚度小于20 μm。

参考文献:

- [1] 张安, 张元东, 刘秀良, 等. 先进航空钛合金材料研究进展 [J]. 科技与创新, 2023 (13): 90-92.
- [2] 黄晓艳, 刘波, 李雪. 钛合金在军事上的应用 [J]. 轻金属, 2005 (9): 51-53.
- [3] MANMEE KAUR, K SINGH. Review on titanium and titanium based alloys as biomaterials for orthopaedic applications [J]. Materials Science and Engineering C, 2019, 102: 844-862.
- [4] 周彦邦, 肖锡云, 王殿斌. 熔融钛与铸型材料的交互作用 [J]. 航空材料, 1984 (1): 26-28.
- [5] SAHA R L, NANDY T K, MISRA R D K, et al. Metal mould reactions during casting of titanium in zircon sand moulds [J]. Transactions of the American Foundrymen's Society, 1990, 98: 253-260.
- [6] 李彬, 廖慧敏, 曾明, 等. 3D打印在砂型铸造中的应用及发展现状 [J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40 (9): 953-957.
- [7] 李坤, 徐志锋, 张守银, 等. 钛合金砂型铸造工艺研究进展 [J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43 (12): 1598-1606.
- [8] 张钱斌. 基于3D打印的发动机缸盖真空浇铸研究 [J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12 (9): 301-303.
- [9] 陈婷婷. 3D打印造型的缸盖真空浇铸工艺研究 [D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2018.
- [10] 费磊, 邢娜, 孙晶. 基于SLS汽车零件铸造模具快速成型技术的研究 [J]. 自动化技术与应用, 2018, 37 (6): 130-133.

- [11] 陈双. 空心涡轮叶片铸造用铝基陶瓷铸型的增材制造及性能研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- [12] 李瑞霞, 熊晓红. 激光选区粉末烧结快速成形技术在精密铸造中的应用 [J]. 中国铸造装备与技术, 2005 (2): 46-48.
- [13] 肖强伟, 李坤, 南海, 等. 一种钛合金砂型铸造用型砂配制及其复合砂型/芯的选区激光烧结成形方法: CN115945641A [P]. 2023-04-11.
- [14] 李坤, 肖强伟, 徐志锋, 等. 一种基于3D打印的钛合金铸造用砂型/芯的制备方法: CN115837445A [P]. 2023-03-24.

Research on Dimensional Accuracy and Transfer Law of Sand Mold for Titanium Alloy Casting Based on SLS Technology

LI Yang¹, XU Zhi-feng¹, ZHANG Shou-yin¹, XIAO Qiang-wei², LI Zheng-xun¹, LI Shen¹

(1. Laboratory of National Defense Key Discipline of Light Alloy Processing Science and Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China; 2. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract:

Combining SLS technology and titanium alloy sand casting, a two-component binder molding sand of phenolic resin-coated ceramsite sand +7 wt.% phosphate powder was used, which was mixed homogeneously and then by means of SLS molding, low-temperature baking and high-temperature baking to prepare titanium alloy casting sand molds. The main research was to study the dimension changes and dimension transfer laws at *X*, *Y* and *Z* directions in the main process stages of preparing sand molds for titanium alloy casting, and pouring titanium alloy castings for verification. The results showed that the dimension changes of the sand mold were small in the SLS forming and low-temperature roasting processes, and the dimension changes were concentrated in the high-temperature roasting process. After high-temperature roasting, the dimensional deviations at *X* and *Y* directions were -1.37 mm to 0.09 mm, and the dimensional deviation at *Z* direction was -3.18 mm to 0.55 mm. The sand mold for titanium alloy casting was prepared by this process, and the surface quality of the stepped sand mold obtained was good without cracks, warping deformation and other defects, and casting experiments were carried out on TC4 titanium alloy, and the titanium alloy castings with better surface quality were obtained, and the dimensional accuracy of the casting reached DCTG10 level.

Key words:

titanium alloy sand casting; selective laser sintering; size transfer law; dimensional accuracy