● 工艺技术 Technology ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2026.6004

多材料砂型柔性铺砂精准成形技术研究

付海丰[1],张学良[2],杨浩秦[3,4],闫丹丹[3],单忠德[3],胡央央[3],李勇军[1],康洪岩[1]

(1. 中国航发哈尔滨东安发动机有限公司，黑龙江 哈尔滨 150060；2. 南京长江工业技术研究院有限公司，江苏 南京 211500；3. 南京航空航天大学,江苏 南京 210016；4. 中国机械科学研究总院集团有限公司,北京 100044)

摘　要:针对多材料砂型柔性铺砂精准制造需求,本文开展了砂型多材料多区域铺砂成形工艺试验研究。以铬铁矿砂与硅砂为复合砂型体系,通过砂块重量与密度,分析区域铺砂层厚误差变化。研究复合砂型铺砂精度、组合效果及力学性能,阐明柔性区域铺砂对砂块密度均匀性及成形性能的影响基理。结果表明,铺砂相对密度越高,分布越均匀,砂块越紧实,层厚密度越稳定;基于密度与体积定量关系,铬铁矿砂单层铺砂误差不超过层厚 4%,0.5 mm 的铺砂层厚误差控制在±0.02 mm 以内;复合砂型层内区域组合铺砂的位置度偏离误差≤15%,轮廓面积尺寸误差≤25%;复合砂型试样抗拉强度为 1.44~1.81 MPa、抗压强度为 4.41~5.58 MPa,均优于单一铬铁矿砂试样,兼具两种型砂的性能优势。基于参数优化下的装置可靠性验证,成功制备了某齿轮室盖上下模的多材料砂铸型,并进行了浇注验证,制备的铸型精度可达 CT7 级,铸件精度可达 CT8~CT9 级,验证了工艺的可行性与精准性。

关键词:多材料砂型;密度表征;复合性能;精准成形;精度验证

中图分类号:TG24　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2026)10-1183-10

Research on Flexible Sand-laying-based Precision Forming Technology for Multimaterial Sand Molds

FU Haifeng[1], ZHANG Xueliang[2], YANG Haoqin[3,4], YAN Dandan[3], SHAN Zhongde[3], HU Yangyang[3], LI Yongjun[1], KANG Hongyan[1]

(1. AECC Harbin Dongan Engine Co., Ltd., Harbin 150060, China; 2. Nanjing Changjiang Industrial Technology Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211500, China; 3. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 4. China Academy of Machinery Science and Technology Group Co., Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: To meet the precision manufacturing requirements of multimaterial sand molds via flexible sand laying, an experimental investigation into the multimaterial and multiregional sand laying process was carried out. With chromite sand and silica sand as the composite molding system, layer thickness errors in regional sand laying were analysed through specimen weight and density measurements. The sand laying accuracy, interfacial bonding behavior, and mechanical properties of the composite sand molds are examined, and the mechanism through which flexible regional sand laying affects the specimen density uniformity and formability is revealed. The results demonstrate that a higher relative sand laying density corresponds to a more uniform particle distribution, denser samples, and a more stable layer thickness and density. On the basis of the quantitative relationship between density and volume, the single-layer sand-laying error of the chromite sand remains within 4% of the layer thickness, and the layer thickness error for the 0.5 mm sand layer is controlled within ±0.02 mm. For multiregional combined sand laying in composite molds, the positional deviation error is less than 15%, and the dimensional error of the profile area is less than 25%. The tensile strength of the composite sand mold samples ranged from 1.44~1.81 MPa, and the compressive strength ranged from 4.41~5.58 MPa, which are higher

收稿日期:2026-01-09

基金项目:国家自然科学基金(52505393);江苏省基础研究计划自然科学基金青年项目(BK20251399);江苏省基础研究计划自然科学基金青年项目(BK20230885);华中科技大学材料成形与模具技术全国重点实验室开放基金(P2025-012)

作者简介:付海丰 1993 年生,硕士,工程师.主要从事轻合金铸造技术研究.Email: 429040332@qq.com

通信作者:张学良,1991 年生,学士,工程师.主要从事先进成形技术研究.Email: 18233564769@163.com

杨浩秦,1990 年生,工学博士,副研究员.研究方向为数字化绿色化精确成形技术与装备.Email: yang-haoqin@nuaa.edu.cn

引用格式:付海丰,张学良,杨浩秦,闫丹丹,单忠德,胡央央,李勇军,康洪岩.多材料砂型柔性铺砂精准成形技术研究[J].铸造技术,2026,47(10):1183-1192.

FU H F, ZHANG X L, YANG H Q, YAN D D, SHAN Z D, HU Y Y, LI Y J, KANG H Y. Research on flexible sand-laying-based precision forming technology for multimaterial sand molds[J]. Foundry Technology, 2026, 47(10): 1183-1192.

中国知网 https://www.cnki.net

than those of the single chromite sand samples and combine the performance advantages of the two molding sands. Following reliability verification of the device with optimized process parameters, multimaterial sand molds for the upper and lower molds of a gear chamber cover are successfully fabricated, and their performance is validated through casting trials. The prepared sand molds achieve a dimensional tolerance grade of CT7, and the castings achieve grades CT8~CT9, which verifies the feasibility and precision of the proposed process.

Key words: multimaterial sand molds; density characterization; composite performance; precise forming; accuracy verification

随着装备制造业向智能化、柔性化和高性能方向创新发展，传统砂型铸造工艺面临精度控制难、材料适配性差等关键问题[1-2]。砂型增材制造技术具备复杂结构快速成形的突出优势，已成为高端装备复杂铸件高性能制造领域的关键支撑技术[3]。作为铸造工业数字化转型的核心载体，多材料砂型增材制造技术应运而生[4-7]。传统砂型制造工艺存在材料单一、层间结合强度低和几何精度控制难等技术瓶颈，难以满足复杂结构铸件对材料功能梯度分布和界面精准融合的需求，亟需实现由单材料向多材料柔性制造的重大技术跨越。砂型 3D 打印过程中铺砂工艺严重影响成形砂型的质量[8]，在多材料复合砂型柔性铺砂过程中，存在随动铺砂层厚误差大、层间界面结合差和成形装备精确控制难等技术难题，严重制约该技术在高精度铸件制造中的应用效能[9-10]。

基于微滴喷射原理的砂型 3D 打印技术发展迅速[11]，受到工程技术和科学研究人员的广泛关注。然而，目前砂型打印的成形精度误差在0.22~0.85 mm 之间[12]，不仅型砂目数和树脂喷射量对成形精度有显著影响，且随着砂粒直径的变化，铺砂表面粗糙度对砂型成形质量同样至关重要[13-14]。与传统工艺相比，3D 打印砂型/芯在铸造工艺开发或复杂铸件单件小批量生产时，优势明显且具有发展潜力[9,15-16]。通过系统分析复合砂型制造过程中的材料特性匹配、界面结合机制与装备控制策略[17]，结合离散元仿真与砂型 3D 打印工艺研究，突破多材料砂型协同铺砂精准控制技术[18-19]。南京航空航天大学绿色智能制造装备团队对多材料砂型精准铺砂工艺与铺砂装置的创新开发，构建出基于分区梯度铺砂层内复合方法。通过铺砂密度测试、界面结合强度表征等试验手段，实现多材料砂型高质量成形与铺砂装置的技术验证。

本研究提出了多材料砂型柔性铺砂精准成形策略，通过动态调整铺砂装置工艺参数、优化界面结合工艺，突破多材料复合砂型制造中的关键技术难题，为高端装备制造领域的砂型增材制造技术发展提供重要的理论支撑与技术储备。随着该技术的进一步转化与推广，有望推动铸造行业向智能化、绿色化和高性能方向转型升级，助力制造业高质量发展。

1 铺砂研究

多材料砂型打印方法是通过铺设不同砂型材料，构建具有局部强度和热导性差异的砂型结构，其核心意义在于突破传统砂型制造对复杂铸件局部不能同时凝固的局限，支持复杂铸件的高性能低应力整体成形。本节内容聚焦铺砂层厚稳定性与两种型砂界面结合研究，实现了多材料砂型分区域柔性铺砂。

1.1 铺砂技术与装置

多材料砂型增材制造装置通过集成多区域多材料组合振动铺砂器与组合式层间加热装置，能够精准铺设多材料型砂，且通过加热，减少砂型固化需要的时间，增强砂型固化效果和结合强度。

图 1 为自主研制出多材料砂型增材制造装置，其中，图 1a 为多材料砂型打印装置结构设计三维图，核心部件为多材料铺砂器与打印装置，用于验证多材料铺砂与打印工艺；图 1b 为刮刀式多材料铺砂器，用于实现同层内多材料的快速精准铺砂；图 1c 为多区域多材料组合振动铺砂器，在振动协同作用下，实现同层内多材料多区域的整体铺砂；图 1d 为数字化升降打印平台，通过伺服精准定位，保障铺砂过程中稳定控制下降的层厚；图 1e 为组合式层间加热装置，采用红外加热增强型砂材料间结合效果；图 1f 为多材料复合砂型，在多材料砂型增材制造装置上打印成功的典型样件。在数字化升降打印平台上铺设底砂，精准控制平台下降 0.5 mm 铺砂层厚；振动式铺砂器通过匹配多料仓落砂量，均匀铺放型砂材料；打印后开启层间加热装置，加快复合砂型固化效率，增强结合效果。铺砂参数如表 1 所示。

1.2 铺砂层厚实验

在砂型铸造工艺研究领域，传统硅砂材质因来源广泛、成本低廉，其制备工艺、性能调控等方向已形成较为成熟的研究体系，相关文献报道较为丰富；然而，具备耐高温、抗粘等优异性能的铬铁矿砂，受限于原料特性及工艺适配性，现有研究多聚焦在基

中国知网 https://www.cnki.net

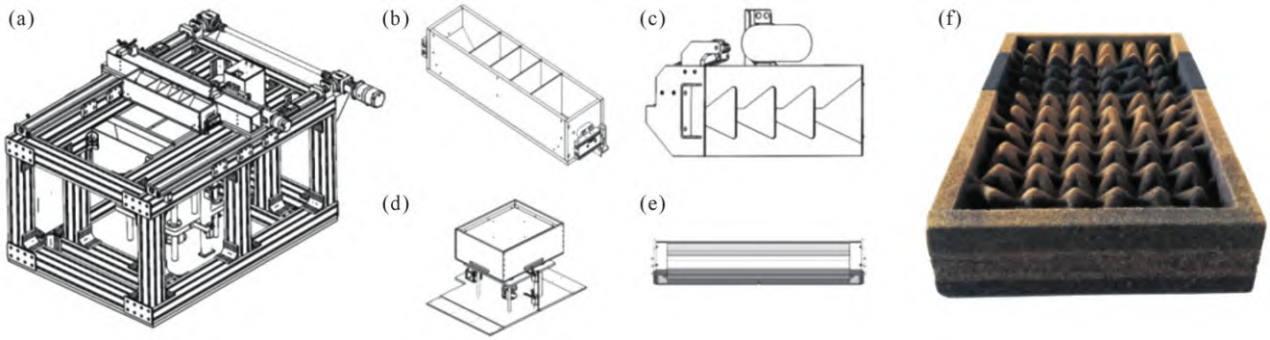


图 1　多材料砂型增材制造技术：(a) 多材料砂型打印装置结构设计；(b) 刮刀式多材料铺砂器；(c) 多区域多材料组合振动铺砂器；(d) 数字化升降打印平台；(e) 组合式层间加热装置；(f) 梯度多材料镂空砂型

Fig.1　Multimaterial sand mold additive manufacturing technology: (a) structural design of the multimaterial sand mold printing device; (b) blade-type multimaterial sand spreader; (c) multiregional multimaterial combined vibration sand spreader; (d) digital lifting printing platform; (e) combined interlayer heating device; (f) gradient multimaterial hollow sand mold

表1 两种型砂材料铺砂参数

Tab.1 Parameters for the sand laying of the two types of molding sand materials

Mold sand type	Mold sand particle size (Mesh)	Heating temperature /℃	Sand laying thickness/mm	Vibration frequency /Hz
Silica sand	70~140	50~100	0.5	150~300
Chromite sand	70~140	50~100	0.5	300~500

础理化性能研究，针对铺砂质量的探索与铺砂工艺的精准调控，仍相对匮乏。因此，本节内容初步以铬铁矿砂为研究对象，围绕试样在振动铺砂工艺中成形高度与层厚精度展开研究。

将两种尺寸的砂块模型按照图 2a 与 d 所示结构布局，其中，图 2b 为 5 cm×5 cm×1 cm 铬铁矿砂薄块试样，图 2e 为 4 cm×4 cm×4 cm 铬铁矿砂厚块试样。采用自主研发的多材料砂型增材制造装置，打印出砂块，通过卡尺精准测量砂块尺寸并称量单体质量，按式(1)测算对应密度并记录。

$$\rho_b=\frac{m}{v} \tag{1}$$

式中，ρ_b 为每块试样平均密度；m 为试样称量质量；v 试样标准体积。

由于在多材料砂型的成形过程中，受铺砂振动频率、料仓落粉控制、黏结剂喷射波动以及层间加热差异等诸多因素影响，不同区域砂块的均匀性存在差异。经式(1)测算砂块试样密度，数据如表 2 所示。由表可知，薄块试样与厚块试样二者密度区间波动范围基本一致。根据式(2)与式(3)计算，薄块试样标准差约为 s_1=0.043 g/cm^3，总体标准差约为 σ_1=0.041 g/cm^3，厚块试样标准差约为 s_2=0.057 g/cm^3，总

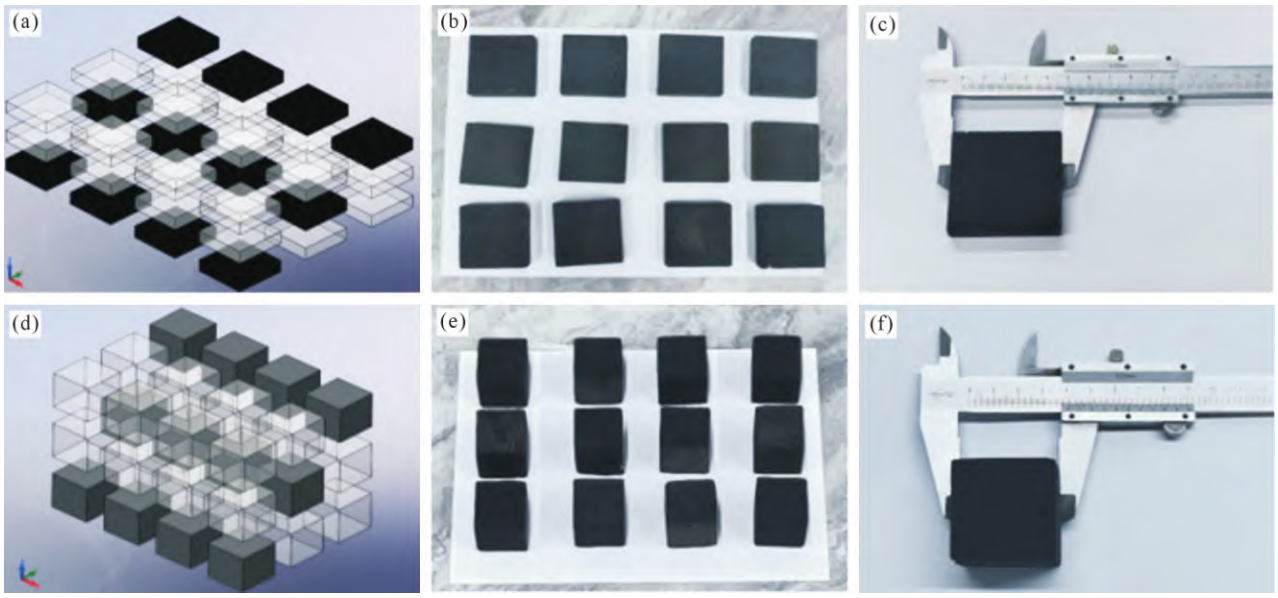


图 2　砂型打印测试砂块：(a) 薄砂块试样立体布局；(b) 铬铁矿砂薄砂块打印试样；(c) 铬铁矿砂薄砂块试样尺寸；(d) 立方砂块试样立体布局；(e) 铬铁矿砂立方砂块打印试样；(f) 铬铁矿砂立方砂块试样尺寸

Fig.2　Sand mold-printed test sand blocks: (a) three-dimensional layout of thin sand block samples; (b) printed samples of chromite sand thin sand blocks; (c) size of the thin sample sand block of chromite sand; (d) three-dimensional layout of cubic sand block samples; (e) printed samples of chromite sand cubic sand blocks; (f) size of the cubic sample sand block

中国知网　https://www.cnki.net

表 2 砂块试样密度
Tab.2 Density of the sand block samples

Thin sand block sample				Thick sand block sample			
Serial number	Density/(g·cm^{-3})	Serial number	Density/(g·cm^{-3})	Serial number	Density/(g·cm^{-3})	Serial number	Density/(g·cm^{-3})
1	2.21	7	2.24	1	2.18	7	2.20
2	2.27	8	2.29	2	2.26	8	2.32
3	2.22	9	2.32	3	2.23	9	2.31
4	2.18	10	2.28	4	2.17	10	2.26
5	2.19	11	2.25	5	2.17	11	2.20
6	2.21	12	2.27	6	2.32	12	2.24

体标准差约为 σ_2=0.054 g/cm^3，均处于较低水平。公式如下：

$$s=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(\rho_i-\bar{\rho})^2} \tag{2}$$

$$\sigma=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\rho_i-\bar{\rho})^2} \tag{3}$$

式中，s 为试样平均密度样本标准差；σ 为试样平均密度总体标准差；ρ_i 为试样样本中的第 i 个数据；$\bar{\rho}$ 为样本数据平均值。

结合表 2 的密度波动范围及标准差计算结果，基于等体积单材料铬铁矿砂块的成形试验，系统分析成形室内不同区域砂块试样的密度分布特点。结果表明，铬铁矿砂整体铺砂量均匀，砂块的密度离散程度较小，未出现显著的局部密度偏差；厚块试样的最低密度略低于薄块试样，反映砂块厚度对密度几乎没有影响，未破坏整体密度分布的稳定性。

基于上述砂块密度分布的分析结果，本节采用砂型试样的堆积密度来表征砂层的致密度，通过待测区域内砂粒的总质量与该区域的总体积的比值，进行计算砂层的理论堆积密度 ρ_d：

$$\rho_d=\frac{\sum_{i=1}^{n}(V_i\cdot\rho_p)}{L_X\cdot L_Y\cdot L_Z} \tag{4}$$

式中，V_i 为表征区域内第 i 个颗粒的体积；L_X、L_Y 和 L_Z 分别为表征区域在 X 轴、Y 轴和 Z 轴方向上的长度；ρ_p 为颗粒的密度。

由公式(1)与(4)中质量、体积与密度的关系可知：当砂块试样质量与表面积一定，型砂密度与铺砂层厚的变化关系相反，相对变化量的绝对值相等：密度增大则层厚减小，密度减小则层厚增大。

为进一步评估铺砂的层厚精度，基于铺砂层厚与密度映射关系，通过待测区域内型砂致密度变化量与该区域的平均密度的比值，求取型砂密度变化比例 Δ%，公式如下：

$$\Delta\%=\frac{\rho_b-\bar{\rho}}{\bar{\rho}} \tag{5}$$

式中，ρ_b 为表征区域实际砂层致密度；$\bar{\rho}$ 为密度平均值。

计算表 2 中平均密度，并与密度最大数值带入公式(5)展开计算，砂型试样的密度变化比例实际不超过 4%，即砂块试样铺砂最大误差应不超过层厚的 4%。0.5 mm 层厚铺砂，单层误差在±0.02 mm 以内，表明该装置下铺砂工艺层厚误差小，铺砂量控制较准。

1.3 铺砂表面轮廓检测

基于铺砂层厚实验，调试多区域多材料组合振动铺砂装置，如图 3a 所示，在铺砂量精准控制的基础上，开展多材料层内铺砂组合界面效果试验。将硅砂、铬铁矿砂设置指定形式的铺设图案，试验工艺参数并表征复合型砂界面组合效果，如图 3b~d 所示。

为了表征复合砂型砂层表面轮廓形貌偏差，采用区域偏离度 ε 表示砂层表面轮廓相对于理论轮廓的整体偏离程度。通过图像轮廓处理方法，计算砂层 XY 方向平面中砂层表面轮廓的分布状态，其标准差定义为该剖面的区域轮廓偏离度，公式如下：

$$\varepsilon=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P_i-\bar{P})^2} \tag{6}$$

式中，P_i 为砂层平面中第 i 个点域的实际位置度坐标，由图像轮廓处理技术提取并换算为物理坐标后获得；$\bar{P}$为理论位置度坐标，即砂层表面轮廓的理想设计坐标值；n 为选取区域轮廓的像素点总数，为保证计算精度，主要选取覆盖砂层轮廓及组合界面交叉坐标等位置，确保采样点具有代表性。

对铺砂后的砂层表面进行全区域对角坐标取样，采用图像轮廓处理方法，对采集到的砂层表面图像进行灰度化、阈值分割、噪声去除等预处理操作，提取砂层轮廓的关键像素点信息，换算实际物理尺寸坐标，如图 4 所示。

将换算后的实际尺寸坐标与理论设计坐标进行对比，计算砂层轮廓的坐标位置度误差与轮廓面积尺寸误差。结果表明：复合砂型砂层铺砂后，其坐标位置度偏离误差控制在 15%以内，轮廓面积尺寸误差偏离控制在 25%以内，基本满足砂层成形规整性要求，验证了该表征方法的有效性与实用性。

中国知网 https://www.cnki.net

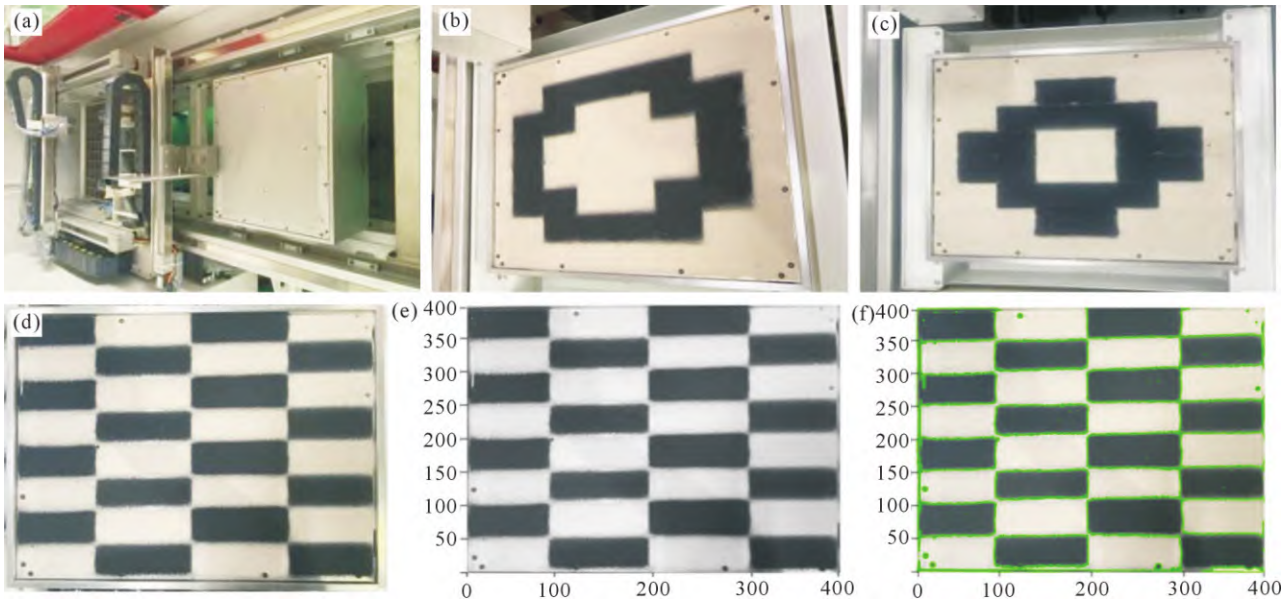
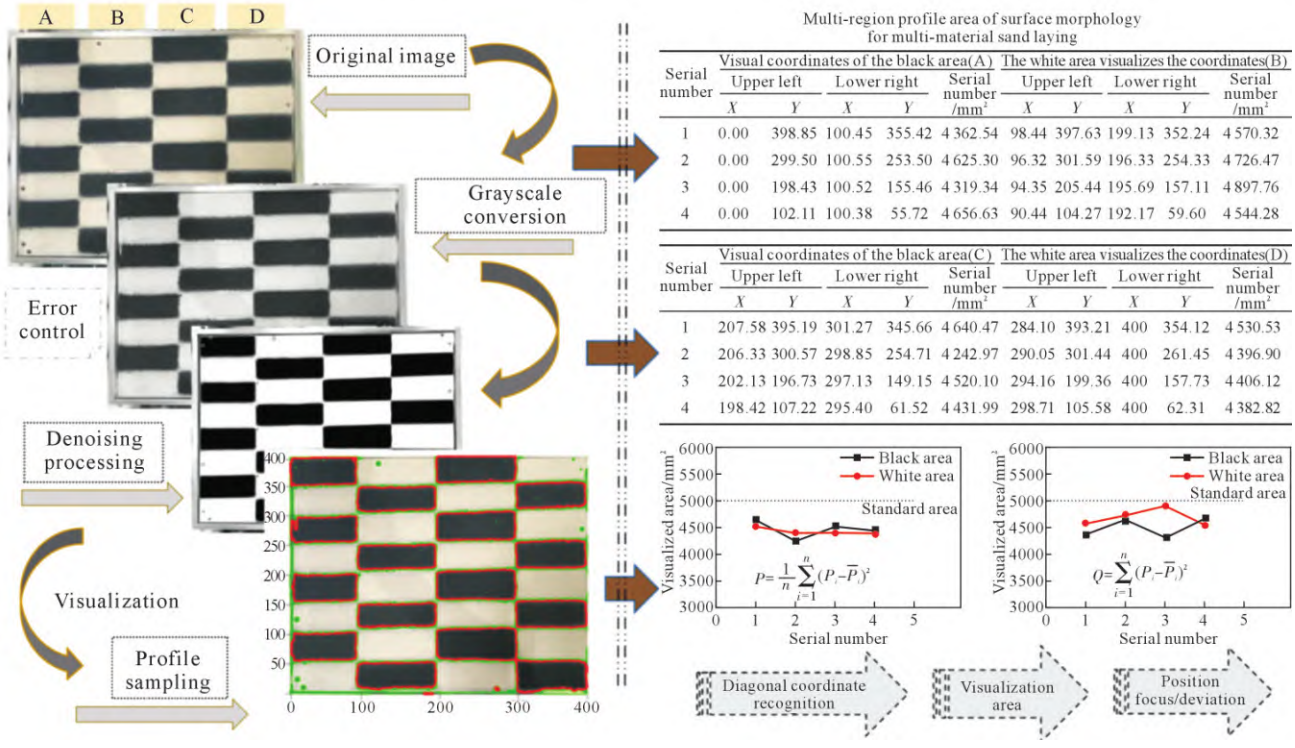


图 3　复合砂型同层内区域铺砂：(a) 振动铺砂装置；(b) 内凹轨迹区域铺砂；(c) 外凸轨迹区域铺砂；(d) 栅格式多材料多区域铺砂；(e) 栅格铺砂区域数值采集处理；(f) 栅格铺砂区域轮廓识别[17]

Fig.3　In-layer regional sand laying of composite sand molds: (a) vibratory sand laying device; (b) sand laying in the concave trajectory area; (c) sand laying in the outwards convex trajectory area; (d) grid-type multimaterial multiarea sand laying; (e) numerical acquisition and processing of grid sand laying regions; (f) contour identification of grid sand laying regions[17]



Serial number	Visual coordinates of the black area(A) Upper left X	Upper left Y	Lower right X	Lower right Y	Serial number /mm²	The white area visualizes the coordinates(B) Upper left X	Upper left Y	Lower right X	Lower right Y	Serial number /mm²
1	0.00	398.85	100.45	355.42	4 362.54	98.44	397.63	199.13	352.24	4 570.32
2	0.00	299.50	100.55	253.50	4 625.30	96.32	301.59	196.33	254.33	4 726.47
3	0.00	198.43	100.52	155.46	4 319.34	94.35	205.44	195.69	157.11	4 897.76
4	0.00	102.11	100.38	55.72	4 656.63	90.44	104.27	192.17	59.60	4 544.28

Serial number	Visual coordinates of the black area(C) Upper left X	Upper left Y	Lower right X	Lower right Y	Serial number /mm²	The white area visualizes the coordinates(D) Upper left X	Upper left Y	Lower right X	Lower right Y	Serial number /mm²
1	207.58	395.19	301.27	345.66	4 640.47	284.10	393.21	400	354.12	4 530.53
2	206.33	300.57	298.85	254.71	4 242.97	290.05	301.44	400	261.45	4 396.90
3	202.13	196.73	297.13	149.15	4 520.10	294.16	199.36	400	157.73	4 406.12
4	198.42	107.22	295.40	61.52	4 431.99	298.71	105.58	400	62.31	4 382.82

图 4　多区域多材料表面轮廓取值位置聚焦偏离测试

Fig.4　Focus deviation test of sampling positions for multiregional and multimaterial surface profiles

2　成形验证

多材料砂型增材制造技术可有效突破传统铸造砂型力学性能不足、成形精度难以精确控制的难题，能够提升复杂铸件成形质量、推动高质量铸造工程化应用，本文以硅砂与铬铁矿砂为复合砂型体系，开展复合砂型力学性能与成形精度检测，并通过某齿轮室盖典型铸件实施铸造验证。

2.1　力学性能测试

图 5a 为多材料砂型打印装置实物，核心部件有多材料铺砂器、微滴喷射打印装置以及组合式层间加热装置；图 5b 为多材料砂型喷墨打印八字块过程；图 5c 是整体打印出的普通硅砂和铬铁矿砂成形的 4 cm×4 cm×4 cm立方体砂块试样；图 5d 是复合两种型砂(硅砂和铬铁矿砂)八字块及圆柱体标准试样。其中树脂加入量占型砂质量的 1.8%(质量分数，

中国知网　https://www.cnki.net

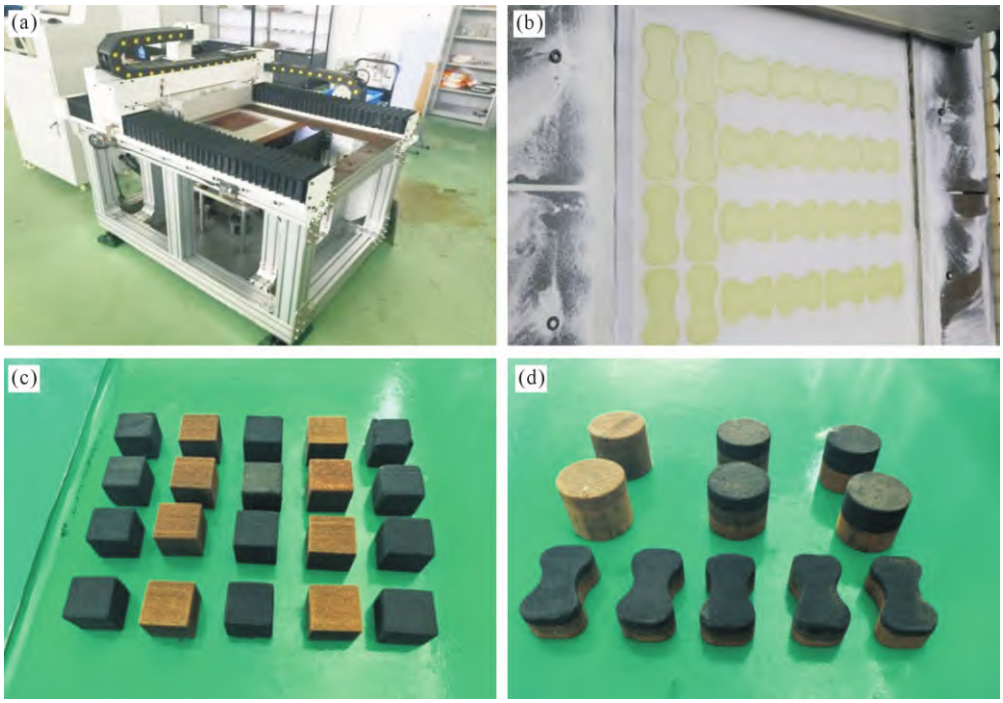


图 5 数字化多材料砂型铺砂打印：(a) 装置实物；(b) 砂型打印过程；(c) 不同型砂(硅砂，铬铁矿砂)试样砂块；(d) 复合砂型(硅砂，铬铁矿砂)八字块及圆柱体

Fig.5 Digital sand laying printing of multimaterial sand molds: (a) physical prototype; (b) sand mold printing process; (c) sand block samples of different mold sands (silica sand and chromite sand); (d) figure-eight blocks and cylinders of composite sand molds (silica sand and chromite sand)

下同)，固化剂加入量为型砂质量的 0.36%，打印制备复合砂型及纯铬铁矿砂八字块标准试样，经 12 h 静置后取样进行拉伸强度测试；打印制备复合砂型及纯铬铁矿砂圆柱标准试样，经 12 h 静置后取样进行抗压强度测试。

力学性能测试数据如表 3 所示，复合砂型八字块试样抗拉强度与抗压强度比较纯铬铁矿砂八字块试样强度明显提高，复合砂型试样抗拉强度为 1.44~1.81 MPa，抗压强度为 4.41~5.58 MPa；铬铁矿砂试样抗拉强度为 1.11~1.50 MPa，抗压强度为 3.19~4.41 MPa。

表 3 砂型性能测试参数

Tab.3 Test parameters for sand mold performance

Serial number	Composite sand mold sample		Serial number	Chromite sand mold sample	
	Tensile strength /MPa	Compressive strength /MPa		Tensile strength /MPa	Compressive strength /MPa
1	1.71	5.21	1	1.18	4.21
2	1.81	5.47	2	1.50	3.77
3	1.77	4.62	3	1.11	3.92
4	1.44	5.58	4	1.23	3.58
5	1.65	4.49	5	1.32	4.41
6	1.73	4.41	6	1.30	3.19

针对复合砂型力学性能提升现象，结合铸造型砂微观特性相关研究成果分析其作用机制：Stachowicz 等[20-21]通过微观表征证实，铬铁矿砂颗粒呈高棱角状且表面存在细微凹凸，而硅砂颗粒粒度分布适配性好，复合后有效改善了型砂界面结合堆积致密性。Łucarz 等[22]通过 SEM/EDS 表征发现，纯铬铁矿砂表面存在原生微裂纹，低树脂添加量下黏结剂易在裂纹处局部富集、砂粒接触点黏结不足。而 Oguntuase 等[23]的研究验证，硅砂表面对树脂的浸润性优异，可引导树脂在异质砂粒表面均匀铺展，在铬铁矿砂与硅砂接触界面形成连续完整的黏结桥，将砂型失效模式从界面脱粘为主转变为树脂黏结内聚断裂为主，提升了砂粒间界面处结合力。

上述微观结构与界面结合状态的双重优化，最终在宏观上表现为复合砂型的抗拉、抗压强度较纯铬铁矿砂型得到提高，如图 6 所示。

试验结果表明复合砂型可整合硅砂与铬铁矿砂的优势，复合设计可有效弥补纯铬铁矿砂在固化性能的不足，为复杂砂型特种部位的高性能适配提供了技术方向和技术支撑，在砂型特种部位有针对性的开展复合砂型设计，能有效增强砂型性能及制造效果。

2.2 成形精度检测

为有效评估本工艺的成形精度与多材料协同制造能力，研究采用自主研发的大尺寸多材料砂型打印设备，基于优化后的工艺参数完成多类型试样的一体化制备。如图 7 所示，研究中分别设计并打印

中国知网 https://www.cnki.net

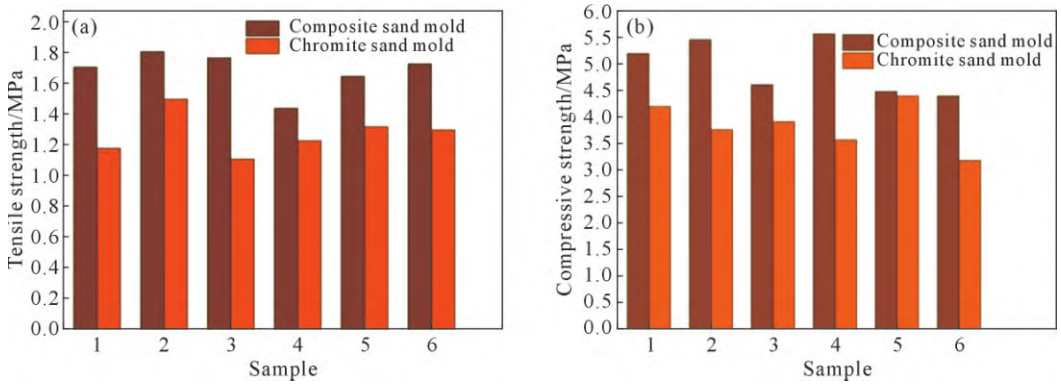


图 6　两种砂型性能测试：(a) 抗拉强度；(b) 抗压强度

Fig.6　Performance tests of two types of sand molds: (a) tensile strength; (b) compressive strength

了 *X*/*Y* 向八字块试样与尺寸精度测试长条试样，同时整体成形了包含多种特征结构的多材料砂型精度验证样板，为后续精度扫描与分析提供基础。

如图 8a~c 所示，利用三维扫描仪对尺寸长条多材料整体成形砂型样板、尺寸长条单材料砂型样板及标准特征整体成形砂型样板进行精度扫描，精度扫描结果如图 8d~f 所示，经结果分析，尺寸长条多材料整体成形砂型样板精度扫描测量表面 95%的数据点的误差分布在[-1.7, +1.2] mm 之间，尺寸长条单材料砂型样板精度扫描测量表面 95%的数据点的误差分布在[-0.63, +1.6] mm 之间，标准特征整体成形砂型样板表面 95%数据点误差分布在[-1.0, +0.8]mm 之间。以上测量结果表明采用多材料砂型柔性铺砂精准成形技术制造的砂型具备实测效果但精度有待提高。

基于本团队多材料铺砂工艺研究[17]的相关成果与工艺原理，结合多材料砂型成形精度检测结果，由于硅砂与铬铁矿砂因颗粒形貌、粒径分布存在固有差异，形成了显著的流动性分异特征，而现有成形工艺未针对该特性差异进行参数适配，铺砂速度略偏离最优值，使铺砂模糊长度增加、砂层粗糙度波动扩大，二者作用破坏了砂层铺展的均匀性，最终放大了多材料砂型的尺寸偏差。针对该核心问题，本团队通过构建材料适配的分区振动控制体系、建立铺砂速度与层厚联动控制机制，适度提升局部铺砂速度，并配合优化振动铺砂时间，实现对铺砂末端形位误差的有效抑制。

2.3　典型件验证

在经过基本试样测试并优化工艺参数后，针对某齿轮室盖典型件开展多材料铸型打印验证，图 9a 为某齿轮室盖多材料整体成形砂型上模，图 9b 为某齿轮室盖多材料整体成形砂型下模，图 9c 为浇注成

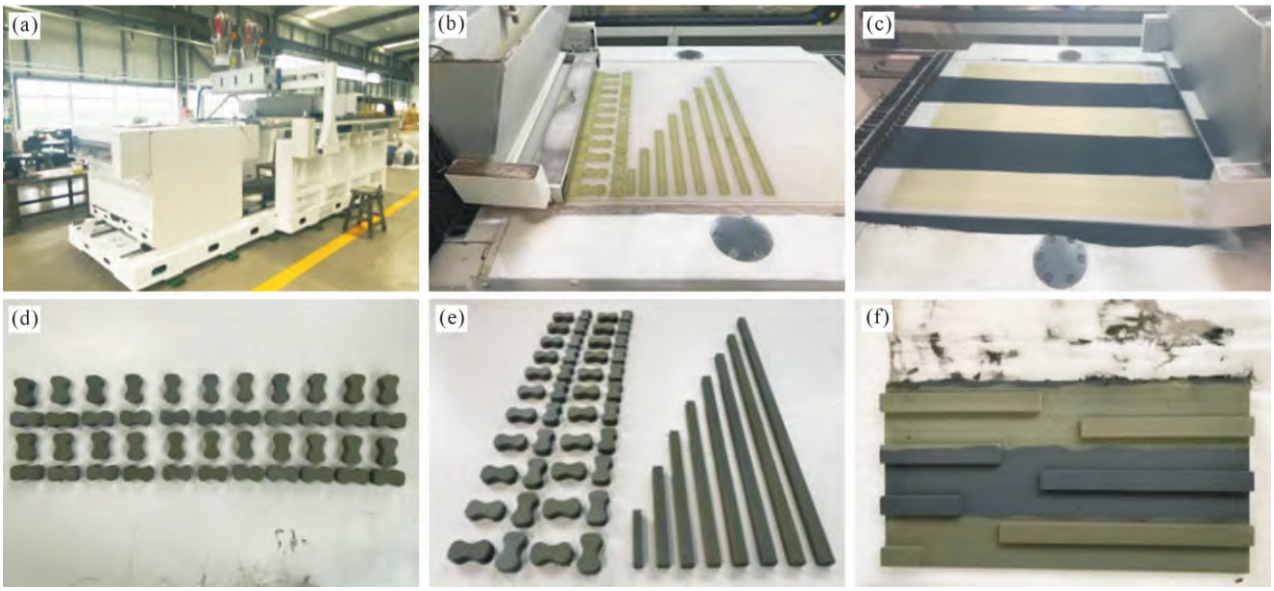


图 7　多材料砂型打印精准成形：(a) 大尺寸多材料砂型打印设备；(b) 砂型性能测试试样打印；(c) 多材料铺砂打印；(d) *X*/*Y* 向“八字块”试样；(e) 尺寸精度测试长条；(f) 多材料砂型整体打印成形样板

Fig.7　Precise forming by multimaterial sand mold printing: (a) large-sized multimaterial sand mold printing equipment; (b) printing of sand mold performance test samples; (c) multimaterial sand laying printing; (d) *X*/*Y* direction “figure-eight block” sample; (e) dimensional accuracy test strip; (f) multimaterial sand mold integral printing forming sample

中国知网　https://www.cnki.net

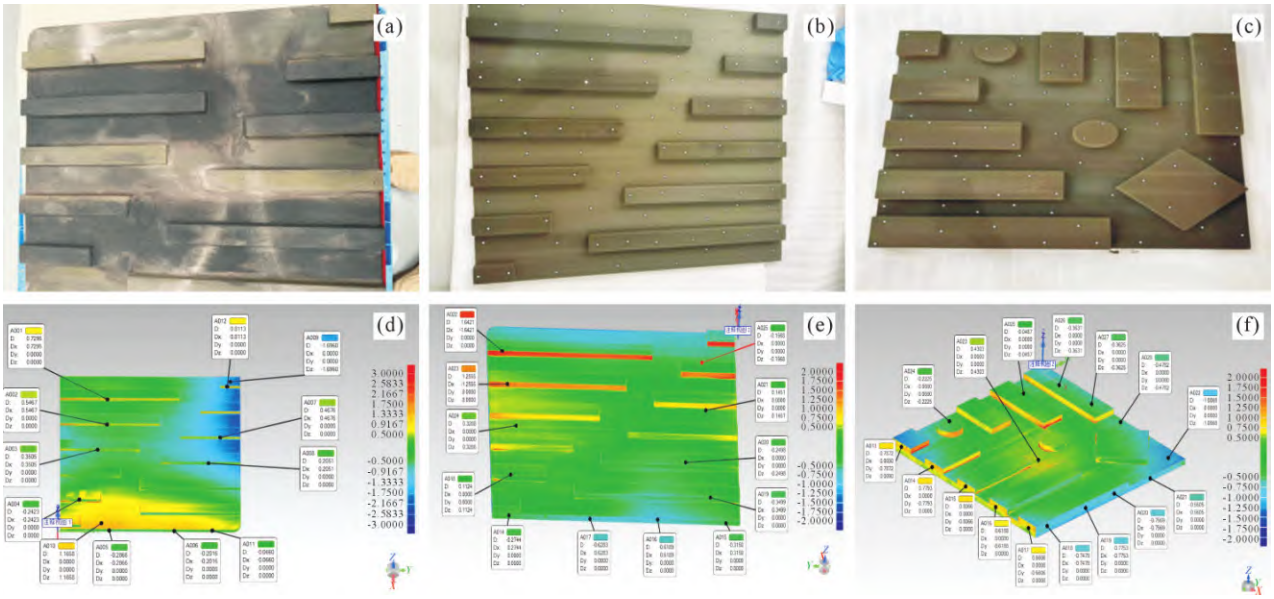


图 8 多材料砂型打印精准成形样件：(a) 尺寸长条多材料整体成形砂型样板；(b) 尺寸长条单材料砂型样板；(c) 标准特征整体成形砂型样板；(d) 尺寸长条多材料整体成形砂型样板精度扫描测量；(e) 尺寸长条单材料砂型样板精度扫描测量；(f) 标准特征整体成形样板精度扫描测量

Fig.8 Multimaterial sand mold-printed precision-formed sample: (a) long-strip multimaterial integral-formed sand mold sample; (b) long-strip single-material sand mold sample; (c) standard feature integral-formed sand mold sample; (d) precision scanning measurement of long-strip multimaterial integral-formed sand mold templates; (e) precision scanning measurement of long-strip single-material sand mold samples; (f) precision scanning measurement of standard feature integral-forming templates

形铸件。利用三维扫描仪对打印成形后的室盖砂型上下模精度扫描，如图 9d 和 e 所示，齿轮室盖多材料整体成形砂型上模精度扫描测量表面 95%的数据点的误差分布在[-0.36, +0.32] mm 之间，某齿轮室盖多材料整体成形砂型下模精度扫描测量表面 95%的数据点的误差分布在[-0.33, +0.25] mm 之间，成形铸件采用激光扫描仪对表面精度扫描 95%数据点误差分布在[-0.32,+0.63] mm 之间，如图 9f 所示。经数据分析，测量结果表明采用多材料砂型增材制造柔性铺砂精准成形技术制造的砂型精度最大偏差在±0.38 mm 内，铸型精度可达 CT7 级；铸件精度整体实测偏差在 1 mm 范围内，铸件精度可达 CT8~CT9 级。

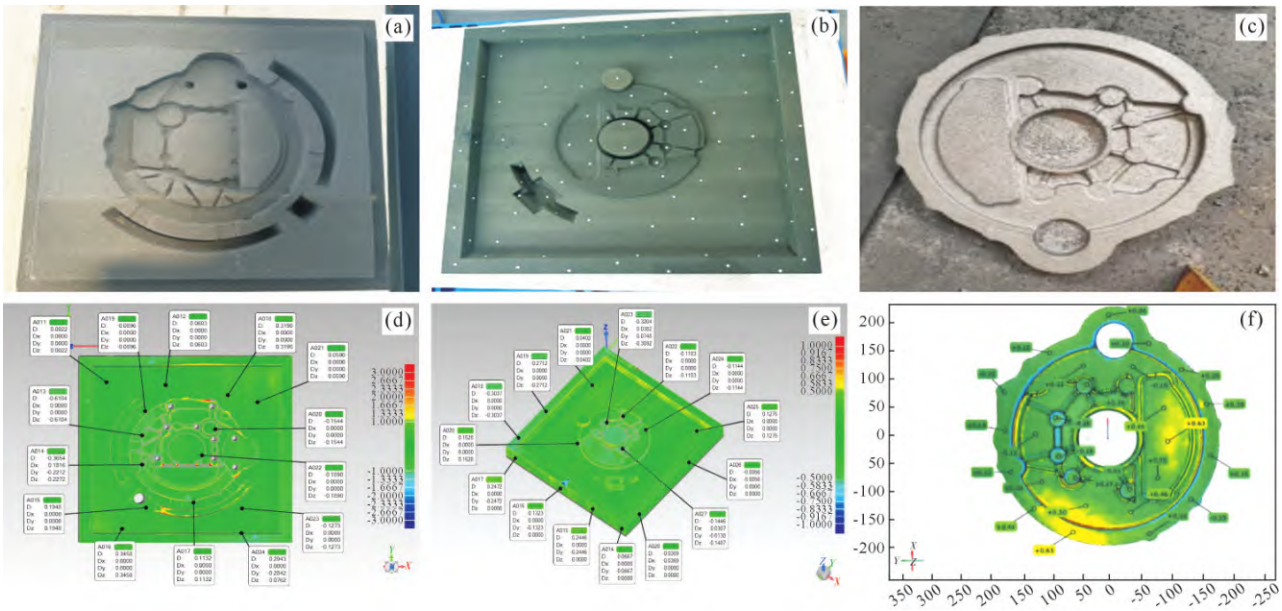


图 9 某齿轮室盖成形精度验证：(a) 砂型上模；(b) 砂型下模；(c) 成形铸件；(d) 砂型上模精度扫描测量；(e) 砂型下模精度扫描测量；(f) 铸件精度扫描测量

Fig.9 Verification of the molding accuracy of a specific gear housing cover: (a) upper sand mold; (b) lower sand mold; (c) formed castings; (d) precision scanning measurement of the upper sand mold; (e) precision scanning measurement of the lower sand mold; (f) precision scanning measurement of the casting

中国知网 https://www.cnki.net

3　结论

(1)通过铬铁矿砂试块重量检测与密度表征，薄块试样密度为 2.18~2.32 g/cm^3，厚块试样为 2.17~2.32 g/cm^3。研究结果表明，铬铁矿砂铺砂均匀性良好，密度离散度小，无显著局部偏差；砂块厚度对密度影响极小，未破坏分布稳定性。结合铺砂层厚与密度的关联关系，铺砂量最大相对误差不超过层厚的 4%，0.5 mm 层厚下单层误差控制在±0.02 mm 以内；复合砂层铺砂后，轮廓位置度误差≤15%，面积误差≤25%，表明该装置铺砂误差小、控制精准。

(2)经过标准砂型试样测试，复合砂型抗拉强度为 1.44~1.81 MPa，抗压强度为 4.41~5.58 MPa；纯铬铁矿砂抗拉强度为 1.11~1.50 MPa，抗压强度为 3.19~4.41 MPa。对比结果表明，复合砂型不仅兼具两种型砂材料优势，且力学性能更好。

(3)依托本方法开发出工业级多材料砂型打印设备，通过样件精度测试优化，成功打印出某齿轮室盖上模与下模多材料砂型，并完成浇注验证，铸型精度可达 CT7 级，铸件精度可达 CT8~ CT9 级。

参考文献：

[1] 孙浩，王明明，张晓妍，蔡玉强，孙丽荣，李冬冬，周翠玉，董小雷. 大型铸件铸造工艺及数值模拟研究进展[J]. 兵器材料科学与工程，2026, 49(1): 200-214.
SUN H, WANG M M, ZHANG X Y, CAI Y Q, SUN L R, LI D D, ZHOU C Y, DONG X L. Research progress on casting process and numerical simulation of large-scale castings[J]. Ordnance Materials Science and Engineering, 2026, 49(1): 200-214.

[2] 党晨晨，王小龙. 3D 打印技术标准在钛及钛合金精密铸造工艺中的应用[J]. 大众标准化，2025(14): 145-147.
DANG C C, WANG X L. Application of 3D printing technology standards in precision casting processes of yitanium and titanium alloys[J]. Popular Standardization, 2025(14): 145-147.

[3] ZHENG J, HU X Y, TANG B, QI T N, PAN Q, ZHU J, JIA R D, QIU X R, ZHANG Z Y, GUAN A Z, LING W, PENG T, WU J, WANG W. Promoting sustainability in 3D printed sand casting through adaptive sand mold structures[J]. Sustainable Materials and Technologies, 2024, 40: e00881.

[4] 李嵩松，刘思琦，马蔷，庞瑞峰，刘晓亮，侯明鹏. 基于多体系统理论的砂型 3D 打印机关键几何误差分析[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版)，2025, 57(1): 55-65.
LI S S, LIU S Q, MA Q, PANG R F, LIU X L, HOU M P. Analysis of key geometric errors of sand mold 3D printer based on multi-body system theory[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (Natural Science Edition), 2025, 57(1): 55-65.

[5] BRYANT N, ODELL J, RAVI S, THIEL J, VILLELA J, VILLELA J O, MACDONALD E, ALEMAN A, LAMONCHA B, VUKSANOVICH B, LONARDO R. 3D printed smart mold for sand casting: monitoring binder curing[J]. International Journal of Metalcasting, 2025, 19: 643-652.

[6] 强惠，单忠德，杨浩秦，闫丹丹，宋魏飞. 多材料砂型增材制造层间加热与压实整体成形工艺研究[J]. 精密成形工程，2024, 16(7): 1-11.
QIANG H, SHAN Z D, YANG H Q, YAN D D, SONG W F. Integral forming process of interlayer heating and compaction in multi-material sand additive manufacturing[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2024, 16(7): 1-11.

[7] 叶文辉，廖强，宋阳，亢宁宁. 基于 3D 打印技术的钛及钛合金精密铸造工艺[J]. 有色金属加工，2022, 51(5): 34-36, 50.
YE W H, LIAO Q, SONG Y, KANG N N. Precision casting process of titanium and titanium alloy based on 3D printing technology[J]. Nonferrous Metals Processing, 2022, 51(5): 34-36, 50.

[8] 张敬骥，郭智，王超，冉跃龙. 砂型 3D 打印铺砂工艺参数匹配研究[J]. 铸造技术，2023, 44(12): 1130-1138.
ZHANG J J, GUO Z, WANG C, RAN Y L. Parameter matching research of the sand laying process of sand mold 3D printing[J]. Foundry Technology, 2023, 44(12): 1130-1138.

[9] 郑雨杭，蒋松，周奇，廖慧敏，李玉和，曾明. 3DP 打印砂型(芯)的研究及应用进展[J]. 热加工工艺，2023, 52(23): 29-34.
ZHENG Y H, JIANG S, ZHOU Q, LIAO H M, LI Y H, ZENG M. Research and application progress of 3DP printed sand mold (core)[J]. Hot Working Technology, 2023, 52(23): 29-34.

[10] 李彬，廖慧敏，曾明，李玉和. 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.
LI B, LIAO H M, ZENG M, LI Y H. Application and development of 3D printing in sand mold casting [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2020, 40(9): 953-957.

[11] 赵蒙蒙，刘丰，张肖男，郭智. 基于表面轮廓参数评定的铺粉质量研究[J]. 铸造技术，2018, 39(10): 2296-2299.
ZHAO M M, LIU F, ZHANG X N, GUO Z. Study on powder laying quality based on the evaluation of surface profile parameters[J]. Foundry Technology, 2018, 39(10): 2296-2299.

[12] 郭智，王绍宗，冉跃龙，陈文刚，滕绍东，王超. 铸造砂型 3D 打印后处理工艺对变壁厚砂型变形行为研究[J]. 铸造技术，2022, 43(10): 912-918.
GUO Z, WANG S Z, RAN Y L, CHEN W G, TENG S D, WANG C. Study on the deformation behavior of variable wall thickness sand mold by a 3D printing posttreatment process[J]. Foundry Technology, 2022, 43 (10): 912-918.

[13] 余洛生，刘丰，刘丽敏，梁昊天，李征. 3D 打印呋喃树脂砂型成形精度研究与控制[J]. 铸造，2022, 71(11): 1407-1412.
YU L S, LIU F, LIU L M, LIANG H T, LI Z. Research and control on dimensional accuracy of 3D printed furan resin sand mold[J]. Foundry, 2022, 71(11): 1407-1412.

[14] 杨伟东，钱致翰，线洪萱，王媛媛. 砂型增材制造中铺砂过程建模研究[J]. 制造技术与机床，2023(6): 5-10.
YANG W D, QIAN Z H, XIAN H X, WANG Y Y. Research on roller size modeling of sand bed laying in 3DP process[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2023(6): 5-10.

[15] GAO G L, ZHANG W K, DU Z M, LIU Q Y, SU Y Q, SHI D Q. Investigation of selected parameters effect on 3D printed sand mold properties through Taguchi method[J]. Rapid Prototyping

中国知网　https://www.cnki.net

Journal, 2021, 27(3): 627-635.

[16] SHAN Z D, GUO Z, DU D, LIU F, LI W J. Digital high-efficiency print forming method and device for multi-material casting molds [J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2020, 15(1): 328-337.

[17] **胡央央，单忠德，杨浩秦，闫丹丹，王尧尧，张学良，陈子宇，孙玉成. 多材料砂型增材制造一体化共面铺砂工艺研究**[J]. **精密成形工程**，2024, 16(1): 148-157.
HU Y Y, SHAN Z D, YANG H Q, YAN D D, WANG Y Y, ZHANG X L, CHEN Z Y, SUN Y C. Research on integrated co-planar sand laying process for multi-material sand mold additive manufacturing [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2024, 16(1): 148-157.

[18] **石利彤，姚山. 复合粉体混合过程的离散元建模仿真**[J]. **中国材料进展**，2025, 44(9): 854-861.
SHI L T, YAO S. Modeling and simulation of heterogeneous powder mixing process based on discrete element method[J]. Materials China, 2025, 44(9): 854-861.

[19] **金军，刘轶，周志军，李天才. 宝珠砂在砂型** 3D **打印技术中的研究与应用**[J]. **材料导报**，2025, 39(S2): 95-98.
JIN J, LIU Y, ZHOU Z J, LI T C. Research and application of pearl sand in sand mold 3D printing technology [J]. Materials Reports, 2025, 39(S2): 95-98.

[20] STEC K, PODWÓRNY J, PSIUK B, KOZAKIEWICZ Ł. Determination of chromite sands suitability for use in moulding sands [J]. Archives of Foundry Engineering, 2017, 17(2): 107-110.

[21] STACHOWICZ M, GRANAT K, PAŁYGA Ł. Influence of sand base preparation on properties of chromite moulding sands with sodium silicate hardened with selected methods [J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2017, 62(1): 379-383.

[22] ŁUCARZ M, GARBACZKLEMPKA A, DROŻYŃSKI D, SKRZYŃSKI M, KOSTRZEWA K. Mechanical reclamation of spent moulding sand on chromite sand matrix; removal of alkali-phenolic binder[J]. Materials, 2023, 16(7): 2919.

[23] OGUNTUYI S D, NYEMBWE K, SHONGWE M B, KABASELE J, MOJISOLA T. A review of the influence of sand properties on parts manufactured by rapid sand casting through additive manufacturing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2025, 136(5): 1989-2002.

(责任编辑：宫文婧)

中国知网 https://www.cnki.net