

原砂粒度级配对增材制造砂型性能的影响

郭树人, 林少凯, 曹华堂, 刘鑫旺, 董选普

(华中科技大学材料科学与工程学院, 材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北武汉 430074)

摘要: 基于Fuller Thompson理论, 研究了原砂的连续级配、均匀级配、间断级配对三维打印砂型性能的影响, 分别测试了四种粒度级配条件下的粉末床密度、常温24 h和100 °C烘干20 min的抗拉强度、X、Y方向常温和100 °C烘干20 min的尺寸精度。研究表明: 连续级配的粉末床密度最低, 为 $1.252 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 均匀级配的粉末床密度最大, 为 $1.305 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; 均匀级配常温24 h抗拉强度最大, 当喷墨量为150%时, 其抗拉强度为2.356 MPa, 而连续级配的抗拉强度最低, 为1.581 MPa; 100 °C烘干20 min的抗拉强度明显高于常温24 h抗拉强度, 当喷墨量为200%时, 其烘干强度提高了42.41%; 当喷墨量为100%时, 连续级配的X、Y方向尺寸精度最高, X方向尺寸误差为+0.21 mm, Y方向尺寸误差为+0.26 mm, 而均匀级配的尺寸误差最大, X方向尺寸误差为+0.55 mm, Y方向尺寸误差为+0.67 mm; 四种级配烘干之后的尺寸误差明显小于常温24 h的尺寸误差。

关键词: 三维砂型打印; 粒度级配; 抗拉强度; 尺寸精度

砂型铸造是一种成形金属零件常用的经济有效的方法, 而三维打印(Three dimensional printing, 3DP)技术是一种增材制造(AM)技术, 由麻省理工学院发明, 该技术已被公认为最有前景的铸造砂模生产技术之一^[1-2], 三维砂型打印(Three dimensional sand printing, 3DSP, 以下简称3DSP)技术采用粉末粘结剂喷墨技术, 相比传统造型方法具有很多优势: 3DSP不需要模具, 无需考虑分型面的影响; 同时砂芯和砂型可以一体化设计, 大大缩短从设计到生产的交付周期^[3]; 可以生产传统工艺无法生产的具有复杂几何形状和复杂内腔结构的零件^[4]。

国内外研究人员对基于三维砂型打印技术的设备、工艺、材料等进行了广泛的研究, 周志军等^[5]研究了工艺参数、外部引入热能、机械振动等对砂型强度的影响; 张景豫等^[6]研究了铺粉参数对砂型强度的影响, 试验结果表明影响砂型强度的因素主次顺序为下砂口宽度、打印层厚度、紧实板角度。Nicolas等^[7]研究了铺粉速度、喷墨量等对砂型的抗拉强度和透气性的影响规律, 试验结果表明喷墨量仅影响砂型的抗拉强度, 增加铺粉速度会增大透气性但会降低砂型的抗拉强度。Hackney等^[8]研究了工作缸中不同位置处的尺寸精度、抗拉强度、抗压强度等性能的各向异性。Guo^[9]研究了固化剂含量和粘度对硅砂流动性的影响机理, 研究发现, 增加固化剂的含量会显著降低硅砂的流动性, 较高粘度的固化剂对硅砂的流动性影响较大, 同时固化剂会润湿砂粒并增加了砂粒之间的内聚力。Ramakrishnan等^[10]研究了无机粘结剂对砂型性能的影响, 通过添加热源使砂型固化, 并确定了最佳的工艺参数。田小勇等^[11]研究了玻璃陶瓷3DP工艺中粉末粒度(粒径在100 μm以下)对产品性能和工艺过程的影响, 结果表明细颗粒质量的增加对粉末床的稳定产生了负面影响。赵火平等^[12]研究了不同连续粒径分布的宝珠砂的成形性能, 探讨了粒径分布对砂型强度、透气性、发气性等性能的影响。

然而, 目前关于粒度级配对3DSP砂型性能的影响规律研究较少。3DSP实际应用过程中发现, 粒度级配对砂型的性能影响很大, 不同的粒度级配会导致砂型芯性能的变化, 也会带来砂型的尺寸精度改变。因此本文通过应用Fuller-Thompson级配理

作者简介:

郭树人(1995-), 男, 满族, 博士研究生, 主要研究方向为铸造砂型增材制造及工艺设计。电话: 18202729131, E-mail: gsr@hust.edu.cn

通讯作者:

董选普, 男, 教授, 博士生导师。电话: 13037116051, E-mail: dongxp@hust.edu.cn

中图分类号: TG221

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

04-0420-06

收稿日期:

2022-07-22 收到初稿,

2022-11-22 收到修订稿。

论进行原砂的多种级配,探讨粒度级配三维砂型打印工艺的粉末床密度、砂型强度及尺寸精度的影响规律,为三维砂型打印提供一定的理论指导。

1 试验材料与方法

1.1 级配理论

粒度级配是指各种粒径颗粒的搭配比例或分布情况,常见的粒度级配类型有以下三种。

①连续级配:连续级配是采用标准筛对其进行筛分试验,这种由大到小,逐级粒径均有按比例互相搭配组成的混合料,称为连续级配,常见的连续级配理论是Fuller-Thompson提出的,其级配公式如下:

$$P = 100 \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (1)$$

式中: P 为砂粒在筛孔尺寸 d 上的通过百分率(%); d 为筛孔尺寸; D 为砂粒的最大粒径。

②间断级配:间断级配是剔除其中一个或几个分级而形成一种不连续的混合料,这种混合料称为间断级配混合。

③均匀级配:颗粒分布范围较窄,形成均匀级配。

1.2 试验材料及设备

试验材料主要有呋喃树脂、固化剂(苯磺酸)和石英原砂,化学成分如表1所示,粒度分布如表2所示。用标准筛粒径0.3~0.25 mm、0.25~0.18 mm、0.18~0.15 mm、<0.15 mm四种粒度分布。后文使用0.3~0.25 mm代表粒径为0.3~0.25 mm的铸造原砂,其他粒度分布表述亦然。因打印层厚为0.3 mm,所以筛去了粒径大于0.3 mm的原砂。

3D打印设备选用某公司自主研发的HX-300-Ⅰ型3DP砂型打印机,工艺参数设置如下:打印层厚为0.3 mm,打印速度为低速,送粉系数为0.05,铺粉辊

表1 铸钢砂化学成分

Table 1 Chemical composition of cast steel sand $w_B/\%$

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	CaO
98.63	0.67	0.1	0.11	0.09	0.15

表2 铸造原砂粒度分布

Table 2 Particle size distribution of cast steel sand

项目	筛号/目				
	50	70	100	140	200
筛孔尺寸/mm	0.300	0.212	0.150	0.106	0.075
含量/%	5.1	35.8	48.8	9.6	0.7

转速为3 000 r·s⁻¹,铺粉辊直径为25 mm,标准喷墨量(100%)喷出树脂质量为型砂质量的1.46%。根据设备设置,以垂直于成形面的方向为Z方向,铺粉方向为Y方向,同时垂直与Z、Y的方向为X方向。

1.3 试验方法

1.3.1 铸造原砂级配

根据级配理论配制四种粒度级配。其中级配1为均匀级配,即0.25~0.18 mm占比为100%的原砂;级配2为70/140的石英原砂;级配3为间断级配即0.3~0.18 mm占比为29.29%,<0.15 mm占比为70.71%的原砂;级配4为根据富勒级配理论配制的连续级配即粒径0.3~0.25 mm占比为8.71%,0.25~0.18 mm占比为13.83%,0.18~0.15 mm占比为6.75%,<0.15 mm占比为70.71%的原砂。

1.3.2 试样设计及性能测试

用3DSP打印机分别使用75%、100%、150%和200%的喷墨量打印标准“8”字试样(图1a),利用数显液压强度试验机测试其抗拉强度;打印30 mm×30 mm×30 mm的立方体试样(图1c),利用游标卡尺测量X和Y方向的尺寸精度;打印带有空腔的圆柱容器试样

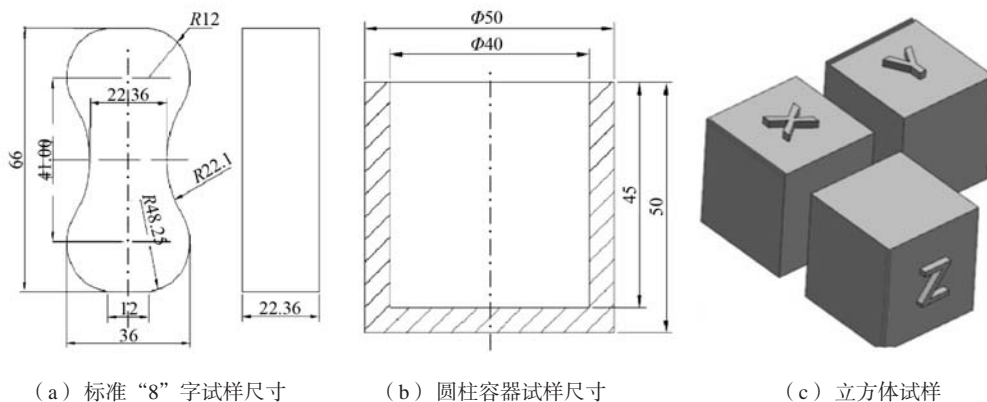


图1 试样设计图纸和照片

Fig. 1 Sample design and photos of samples

(图1b),待试样完全硬化后,将其携带内部未喷射粘结剂的型砂一并取出,测试容器内的粉末床密度;利用Quanta 200型扫描电子显微镜(SEM)观察试样粘结桥微观形貌。以上每个实验项目均进行3次重复实验进行统计。

2 试验结果与分析

2.1 粉末床密度试验分析

四种级配的粉末床密度测试如图2所示,粉末床密度由大到小依次为:级配1 > 级配2 > 级配3 > 级配4。级配3和级配4的粉末床密度较低的原因是:一方面是由于细砂粒占比较大,当细砂粒在粗砂粒的周围进行堆积时,由于粗砂粒的阻碍作用将会导致粗砂粒和细砂粒之间的空隙大于细砂粒相互堆积的空隙,因此导致粉末床密度较低^[11-13];另一方面是由于细砂粒的流动性越差,导致细砂粒容易聚集,从而在粉末床内形成大量的空隙,导致粉末床密度较低。

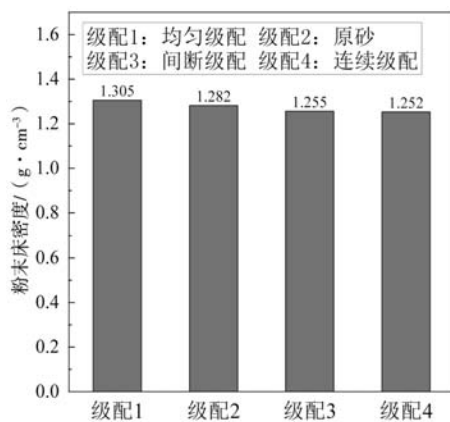


图2 四种级配的粉末床密度

Fig. 2 The powder density of the four particle gradations

2.2 抗拉强度试验分析

打印好的“8”字试样从打印机中取出,放置24 h后测试存放强度。24 h的试样抗拉强度结果如图3所示。随着喷墨量的变化,级配1的24 h抗拉强度都最高,当喷墨量为150%时,其抗拉强度达到最大为2.356 MPa;级配3和级配4的24 h抗拉强度较低,主要原因是原砂较细,比表面积大,所以强度变低。同时也发现,单一粒度级配的原砂强度较多,粒度级配的强度性能好。

打印的“8”字试样从机器中取出,放入烘箱进行100 °C烘干20 min,其抗拉强度结果如图4所示,随着喷墨量的增加,级配1烘干之后的抗拉强度最高,级配3和级配4相比级配1和级配2其烘干之后的抗拉强度较低,但是四种级配烘干之后的强度相比不烘干的强度均有明显上升。这主要是由于呋喃树脂在缩聚反应

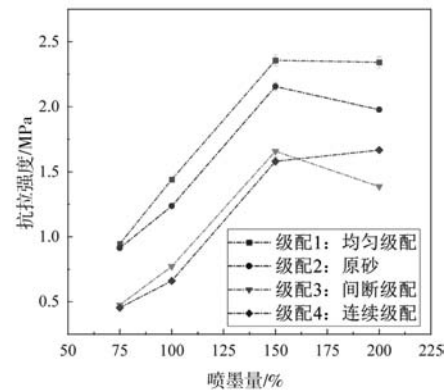


图3 四种级配常温24 h抗拉强度

Fig. 3 The 24 h tensile strength of the four particle gradations at room temperature

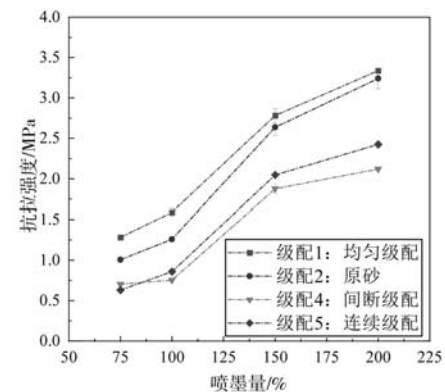


图4 四种级配100 °C烘干20 min抗拉强度

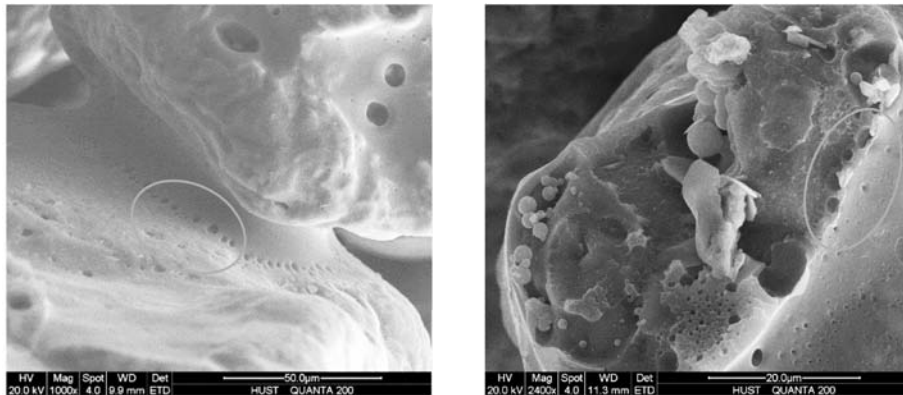
Fig. 4 The tensile strength of drying at 100 °C for 20 min of the four particle gradations

中会生成水,而水会在砂粒与砂粒之间的粘结桥中形成气孔,会降低砂粒与砂粒之间的结合强度,如图5所示。而在100 °C下烘干会加速水的蒸发,并且由于其粉末床密度较低,水蒸气很容易从空隙中逸出,从而提高了抗拉强度。单一粒度级配的原砂强度也是最高的。

2.3 尺寸精度试验分析

2.3.1 四种级配尺寸精度分析

四种级配的X和Y方向尺寸长度测试如图6所示:随着喷墨量的增大,四种级配的X和Y方向尺寸长度先降低后增加,当喷墨量为100%时,四种级配的X和Y方向尺寸长度最小,即尺寸误差最小。四种级配尺寸误差由大到小依次为级配1 > 级配2 > 级配3 > 级配4,当喷墨量为100%时,级配1的X方向尺寸误差为+0.55 mm,级配4的X方向尺寸误差为+0.21 mm,尺寸误差降低了38.1%,级配1的Y方向尺寸误差为+0.67 mm,级配4的Y方向尺寸误差为+0.26 mm,尺寸误差降低了38.8%。其原因主要是由于喷头喷射的粘结剂首先在粉末床表面

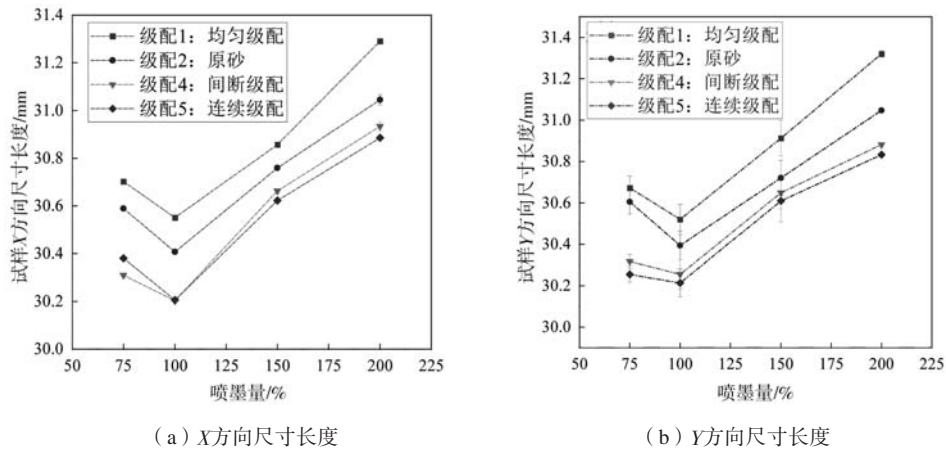


(a) 粘结桥表面气孔

(b) 粘结桥断面气孔

图5 不烘干树脂砂的粘结桥气孔微观形貌

Fig. 5 The microstructure of the bonded bridge pore



(a) X方向尺寸长度

(b) Y方向尺寸长度

图6 四种级配X、Y方向尺寸长度

Fig. 6 The dimensions of the four particle gradations in the X、Y directions

形成一定厚度的液层，随后粘结剂在渗透驱动力的作用下向下渗透，砂粒表面形成粘结剂薄膜，相邻砂粒之间形成粘结桥，导致孔隙减少，通道减少，随着喷墨量的继续增大，粘结剂纵向渗透的阻力增大，因此以横向渗透为主，导致X和Y方向尺寸误差增大，同时由于级配1的砂粒尺寸大并且比表面积小，因此粘结剂横向渗透导致其尺寸误差最大。所以单一粒度原砂不利于尺寸精度的提高。

2.3.2 烘干与未烘干尺寸精度对比

四种级配试样X和Y方向烘干与未烘干尺寸长度测试如图7所示，由图7可以得出：四种级配X方向和Y方向试样烘干的尺寸误差都小于未烘干的尺寸误差。所以，3DSP打印的呋喃树脂砂型（芯），采用烘干工艺，不仅可以提高强度，同时也可以提高尺寸精度。其原因在于呋喃树脂在加热条件下实现快速聚合反应，使得液态树脂的扩散程度降低而减少试样向外膨

胀，有利于砂型（芯）精度的稳定。

3 结论

(1) 3DSP打印砂型（芯）的密度以均匀级配的粉末床密度最大，为 $1.30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，连续级配的粉末床密度最低，为 $1.25 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

(2) 3DSP砂型（芯）的抗拉强度随着喷墨量的变化而变化。单一粒度的原砂（即均匀级配）的常温抗拉强度和烘干抗拉强度都是最大的，烘干可以提高试样的抗拉强度。当喷墨量为200%时，常温抗拉强度达到2.00 MPa，100 °C烘干20 min的试样抗拉强度可以达到3.00 MPa以上。

(3) 3DSP砂型（芯）的尺寸精度和级配密切相关。多粒度级配的原砂可以得到较高打印砂型（芯）精度，单一粒度的原砂不利于打印砂型（芯）的尺寸精度稳定。对试样进行烘干处理可以提高试样的尺寸精度。

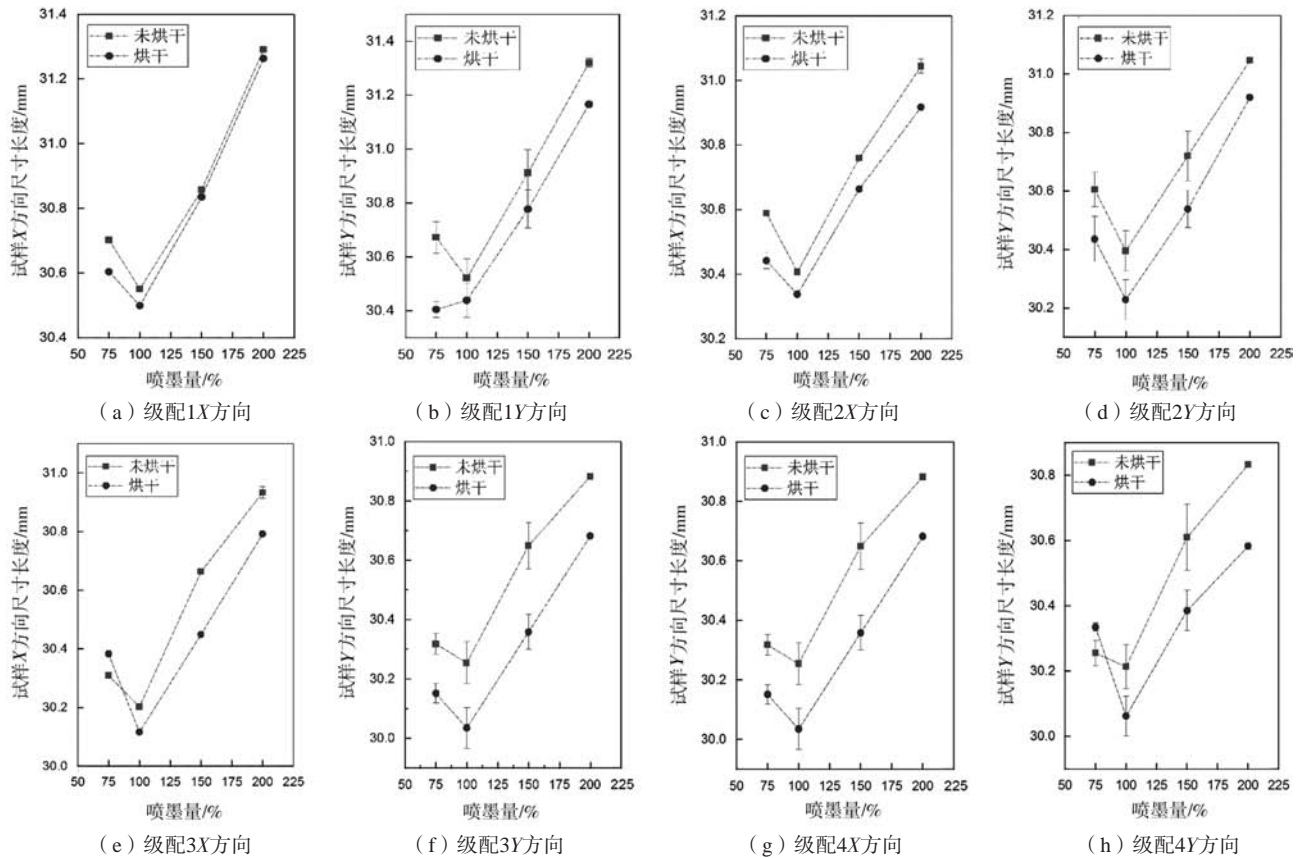


图7 四种级配在X、Y方向烘干与未烘干尺寸长度

Fig. 7 The baked and unbaked dimensions of the four particle gradations in the X、Y directions

参考文献:

- [1] CIMA M, SACHS E, CORNIE J, et al. Three dimensional printing: rapid tooling and prototypes directly from CAD representation[C]// 1990, <https://www.researchgate.net/publication/268412467>
- [2] SACHS E, CIMA M, CORNIE J, et al. Three-dimensional printing: the physics and implications of additive manufacturing [J]. CIRP Annals, 1993, 42 (1): 257-260.
- [3] MITRA S, RODRIGUEZ DE CASTRO A, EL MANSORI M. The effect of ageing process on three-point bending strength and permeability of 3D printed sand molds [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97 (1-4): 1241-1251.
- [4] MITRA S, RODRIGUEZ DE CASTRO A, EL MANSORI M. On the rapid manufacturing process of functional 3D printed sand molds [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 42: 202-212.
- [5] 周志军, 刘轶, 徐云龙. 提高铸造用3D打印砂芯(型)强度的方法 [J]. 铸造技术, 2016, 37 (10): 2284-2285.
- [6] 张景豫, 郭永斌, 刘轶. 3D打印呋喃树脂砂芯强度影响因素的研究 [J]. 现代铸铁, 2017, 37 (1): 77-78.
- [7] CONIGLIO N, SIVARUPAN T, EL MANSORI M. Investigation of process parameter effect on anisotropic properties of 3D printed sand molds [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94 (5-8): 2175-2185.
- [8] HACKNEY P M, WOOLDRIDGE R. Characterisation of direct 3D sand printing process for the production of sand cast mould tools [J]. Rapid Prototyping Journal, 2017, 23 (1): 7-15.
- [9] GUO Z, SHAN Z, DU D, et al. Experimental investigation on the flow properties of sand granules in the process of sand mold printing [J]. Rapid Prototyping Journal, 2018, 24 (9): 1599-1608.
- [10] RAMAKRISHNAN R, GRIEBEL B, VOLK W, et al. 3D printing of inorganic sand moulds for casting applications[C]//Trans Tech Publ, 2014.

- [11] SUN C, TIAN X, WANG L, et al. Effect of particle size gradation on the performance of glass-ceramic 3D printing process [J]. *Ceramics International*, 2017, 43 (1, Part A) : 578–584. DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.09.197.
- [12] 赵火平. 微喷射粘结快速成形铸造型芯关键技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [13] KWAN A K H, CHAN K W, WONG V. A 3-parameter particle packing model incorporating the wedging effect [J]. *Powder Technology*, 2013, 237: 172–179.
- [14] STOVALL T, DE LARRARD F, BUIL M. Linear packing density model of grain mixtures [J]. *Powder Technology*, 1986, 48 (1) : 1–12.
- [15] YU A, ZOU R P, STANDISH N. Modifying the linear packing model for predicting the porosity of nonspherical particle mixtures [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1996, 35 (10) : 3730–3741.

Effects of Particle Gradation of Base Sand on Performance of Additive Manufacturing Sand Mold

GUO Shu-ren, LIN Shao-kai, CAO Hua-tang, LIU Xin-wang, DONG Xuan-pu

(State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mold Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract:

Based on Fuller Thompson theory, the effects of continuous gradation, uniform gradation, gap gradation of the base sand on the 3DP sand mold performance are studied. The powder bed density under four particle gradations conditions, the tensile strength of drying at room temperature for 24 h and 100 °C for 20 min, and the dimensional accuracy of drying at normal temperature and 100 °C for 20 minutes in *X* and *Y* directions were tested respectively. The study indicates that the continuous gradation has the lowest powder density of $1.252 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, and the uniform-gradation has the highest powder density of $1.305 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; The uniform-gradation has the highest tensile strength at room temperature of 24 h, when the inkjet volume is 150%, the tensile strength is 2.356 MPa, and the continuous gradation has the lowest tensile strength of 1.581 MPa; the tensile strength of drying at 100 °C for 20 min is significantly higher than that at room temperature of 24 h, when the inject volume is 200%, the drying strength is increased by 42.41%; when the inject volume is 200%, the continuous gradation has the highest dimensional accuracy in the *X* and *Y* directions, the dimensional error in the *X* direction is +0.21 mm, and the dimensional error in the *Y* direction is +0.26 mm; the uniform-gradation has the highest dimensional error, the dimensional error in the *X* direction is +0.55 mm, and the dimensional error in the *Y* direction is +0.67 mm; the dimensional error of four particle gradations after drying is obviously smaller than that of 24 h at normal temperature.

Key words:

3D sand printing; particle gradation; tensile strength; dimensional accuracy