

基于喷墨 3D 打印的铸造砂型（芯）成形工艺参数应用研究

高桂丽^{1,2,3}, 张伟坤¹, 杜志敏¹, 刘庆义², 倪允强², 苏彦庆³, 石德全¹

(1. 哈尔滨理工大学材料科学与工程学院, 黑龙江哈尔滨 150040; 2. 潍柴动力股份有限公司, 山东潍坊 261061; 3. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要: 通过正交试验的方法研究了材料（旧砂比例）、工艺参数（打印层厚、X方向分辨率）对铸造型（芯）初始抗拉强度的影响规律。研究发现：增大旧砂比例砂型强度有所下降；随着打印层厚的增大，强度逐渐减小，灼减量减小；X方向分辨率与粘结剂加入量有关，随着X方向分辨率的减小，粘结剂加入量增大，强度增大，灼减量增大。另外，打印层厚对强度影响最大，X方向分辨率次之，旧砂比例最小。最终确定最佳打印参数为：旧砂比例30%、层厚0.28 mm、X方向分辨率0.09 mm，基于该参数打印的砂型（芯）能够很好地满足铸造要求。

关键词: 铸造砂型（芯）；喷墨3DP打印；抗拉强度；灼减量

作者简介:

高桂丽（1979-），女，副教授，长期从事材料加工过程检测与控制技术及增材制造技术方面的研究。
E-mail: gao-guili@163.com

通讯作者:

石德全，男，教授。E-mail: shidequan2008@163.com

中图分类号: TG242

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)06-0627-05

基金项目:

国家自然科学基金 (51975165)。

收稿日期:

2020-01-07 收到初稿，

2020-02-28 收到修订稿。

快速成形技术是20世纪80年代兴起的一项先进制造技术，用于砂型（芯）快速成形制造技术主要有两种：选区激光烧结（selective laser sintering, SLS）和喷墨三维打印（three-dimensional printing, 3DP）^[1-4]。SLS利用激光作为热源在设定区域内烧结粉末材料达到固化成形，成形精度较高。但是成形过程中需要预热且极易在热应力的作用下产生收缩和翘曲变形，制件内部有残余应力，而且激光的使用也使得设备及维护成本高。3DP是一种利用打印头运动，在粉床表面设定区域喷射粘结剂液滴，通过粘结剂与混入固化剂的砂子的综合作用，将设定区域固化成形的技术。与SLS相比，3DP具有成形速度快、无残余热应力、设备运行成本低等优点^[5-7]。因此，喷墨3DP具有更广泛的应用前景。

喷墨3DP已广泛应用于复杂铸造砂型（芯）的生产和设计中，如发动机缸体缸盖、叶轮、叶片等^[8-9]。3DP砂型（芯）的力学性能和灼减量取决于原材料和打印工艺参数的选择，打印砂型（芯）的质量与铸件的最终质量密切相关。然而，在清理打印型（芯）时，有大量未喷涂粘结剂的旧砂产生。将旧砂与新砂混合选择适当的打印参数加工成形，即旧砂的二次利用，对节约成本，提高生产效率都非常有意义。旧砂与新砂的混用比例及打印参数的选择将会影响3DP铸造型（芯）的力学性能和灼减量。为了回用旧砂，降低生产成本，有必要开展相关试验研究，为实际生产提供技术支撑。

本文通过正交试验的方法筛选满足生产使用的旧砂混用比例及打印参数，并给出旧砂比例和打印工艺参数对铸造型（芯）强度的影响规律。

1 材料与设备及试验方法

1.1 材料与设备

本试验采用颗粒度为70~140目的3D打印用硅砂，砂粒为不规则形状，如图1所示。砂粒成分为SiO₂，混用的旧砂为打印完成后未成形的砂，旧砂表面残留固化剂，灼减量约为0.28%，经吸尘器收集入砂罐中，二次利用。固化剂为对羟基苯磺酸，粘

结剂为呋喃树脂。

本试验采用德国ExOne公司生产的ExOne MAX 型砂喷墨3DP打印设备,工作箱最大尺寸为1 800 mm × 1 000 mm × 7 00 mm。使用手摇式液压型砂强度试验机测试型芯试样的力学性能。3DP设备成形的抗拉强度试样尺寸如图2所示,成形试样如图3所示。打印完成后将试样取出并清理,放置24 h,待粘结剂完全固化后,将试样放入抗拉强度试样夹具中,匀速加载测试,每组试样测试9个取平均值。灼减量采用高温烧尽树脂,计算烧减量占初始质量比的方法获得。

1.2 试验方法

在对铸造型(芯)进行3DP打印生产过程中,影响性能的工艺参数主要包括旧砂比例、铺砂层厚和X方向分辨率。旧砂比例是根据质量百分比混入原砂中,在打印开始时,原砂被吸入混砂罐中进行称重,并根据设定的参数在混砂罐中加入旧砂。铺砂层厚是指铺砂器单次铺砂的厚度,范围取为0.24~0.36 mm。打印头移动的方向为X方向,X方向分辨率(打印头每移动 x mm喷射一次粘结剂)与树脂加入量相关,每完成一层铺砂,打印头扫过特定区域喷射树脂,范围取为0.06~0.09 mm。

考虑到全因子试验的数量过于庞大,本次试验利用正交表,设计了旧砂比例、层厚、X方向分辨率3因素4水平的正交试验,以获得最佳旧砂配比及工艺参数。正交试验方案如表1所示。

2 结果与分析

2.1 正交试验结果

表2是3因素4水平的正交试验表及试验结果。由表可知,第1组试验 $A_1B_1C_1$ 组合强度最高,达到了3.61 MPa。第4组试验 $A_1B_4C_4$ 组合的灼减量最小,为1.93%。表3是抗拉强度的方差分析结果表。对比表3中各因素 F 值与临界值的大小可知,旧砂比例、层厚和X方向分辨率均为显著影响因素,其中层厚对强度影响最大,X方向分辨率次之,旧砂比例最小。表4为灼减量的方差分析结果表。对比表4中各因素 F 值与临界值的大小可知,层厚和X方向分辨率是影响灼减量的显著因素,其中X方向分辨率影响最大,层厚次之,旧砂比例最小。

根据铸造企业型(芯)性能的标准,抗拉强度不低于1.75 MPa,灼减量不高于2.2%,满足标准的试验为8[#]、12[#]和14[#]试验。综合考虑,最终选择最佳参数为旧砂比例30%、层厚0.28 mm、X方向分辨率0.09 mm。使用该参数打印试样进行验证,抗拉强度1.97 MPa,灼减量2.2%,满足铸造型(芯)性能评估标准。

2.2 工艺参数对抗拉强度的影响

将表1中各参数水平与抗拉强度的关系,采用Minitab软件进行分析,得到抗拉强度与旧砂比例、层厚、X方向分辨率的主效应图,如图4所示。由图4可

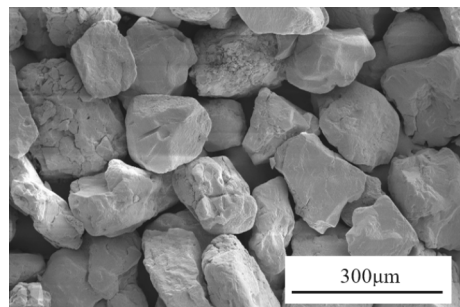


图1 喷墨3DP打印用硅砂扫描照片
Fig. 1 SEM image of silica sand for inkjet 3D printing

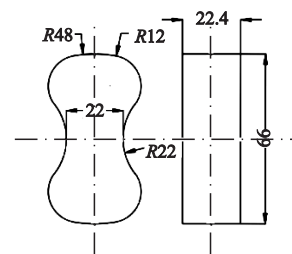


图2 3DP打印的抗拉强度试样尺寸
Fig. 2 Dimension of 3DP sample for tensile strength

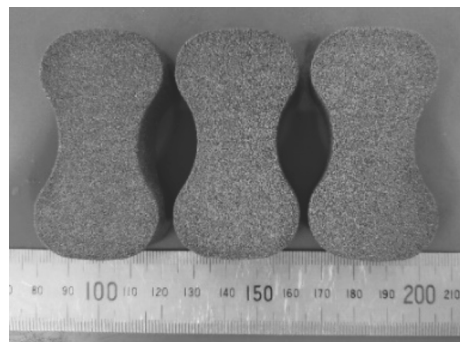


图3 3DP成形抗拉强度试样
Fig. 3 3DP sample for measuring tensile strength

表1 正交试验因素水平表
Table 1 Factors and levels for orthogonal experiment

水平	因素		
	(A)旧砂比例/%	(B)层厚/mm	(C)X方向分辨率/mm
1	0	0.24	0.06
2	30	0.28	0.07
3	60	0.32	0.08
4	90	0.36	0.09

知, 抗拉强度随着旧砂比例的增加逐渐减小, 随着X方向分辨率和层厚的增加也逐渐减小, 三个参数减小幅度逐渐增大, 符合方差分析的结果。

2.2.1 旧砂比例对抗拉强度的影响

粘结桥是粘结剂与固化剂通过酸硬化反应在砂粒之间形成的聚合物链, 为喷墨3DP打印型(芯)提供强度, 粘结桥的断裂取决于砂粒、粘结剂、界面层三者中最小的强度^[11]。由于旧砂是清理3DP铸造型(芯)留下的二次回用砂, 在收集的过程中易混入杂质, 在砂粒表面形成弱界面层, 树脂膜在弱界面层脱离发生附着破裂如图5b所示, 强度低于粘结桥本身断裂的内聚破裂如图5a所示, 使砂芯强度下降。

2.2.2 X方向分辨率对抗拉强度的影响

X方向分辨率与粘结剂加入量相关, X方向分辨率越小, 粘结剂喷射量越多, 对成形件的强度有很大的影响。粘结剂加入量过小, 粘结效果差, 强度低, 成形件易出现断裂, 无法使用等问题。粘结剂加入量过大, 一方面会使3DP型(芯)的灼减量增大, 组织过程中发气增多, 铸造缺陷增多, 另一方面在打印过程中, 粘结剂在粉层间扩散, 影响3DP型(芯)的精度, 尺寸误差增大, 清理困难等。

在打印层厚0.28 mm的条件下, 改变X方向分辨率, 得到抗拉强度曲线如图6所示。由图6可知, 随着X方向分辨率的增大, 抗拉强度逐渐减小。这是因为当X方向分辨率增大时, 粘结剂加入量会减小, 因此粘结剂在砂粒表面形成的粘结层减小, 砂粒间粘结不充分, 从而使得强度下降。

2.2.3 层厚对抗拉强度的影响

3DP打印的基本原理是逐层累加, 打印层厚是关键因素, 会影响3DP型(芯)的生产时间、强度、表面质量等。在其他条件不变的前提下, 打印相同高度的试样, 打印层厚越小, 铺砂次数越多, 打印头扫过特定区域的次数越多, 树脂喷射次数越多, 树脂加入量越大。打印层厚的选取不仅与强度有关, 还取决于砂粒的粒径分布和表面形貌。层厚的最小值应大于砂粒的最大颗粒直径。增大打印层厚可以提高打印效率, 但会使粉层之间的连接变弱, 强度变差, 随着打印层厚的增大, 强度逐渐减小, 灼减量减小。减小层厚一方面可以提高粉层之间的连接, 增加制件强度, 另一方面可以提高尺寸精度和表面质量, 但由于层厚减小会增加铺砂次数, 打印效率也会下降。

在喷墨3D打印过程中, 在旧砂比例和粘结剂加入量不变的情况下, 改变层厚打印试样得到的抗拉强度变化如图7所示。随着打印层厚的增加, 抗拉强度逐渐

表2 3DP打印正交试验及结果
Table 2 Orthogonal experiment and results of 3DP samples

试验 编号	因素			抗拉强度 /MPa	灼减量 /%
	A	B	C		
1	0	0.24	0.06	3.61	3.67
2	0	0.28	0.07	3.10	2.67
3	0	0.32	0.08	2.32	2.22
4	0	0.36	0.09	1.48	1.93
5	30	0.28	0.06	3.02	2.97
6	30	0.24	0.07	3.22	2.74
7	30	0.36	0.08	1.70	1.99
8	30	0.32	0.09	1.82	2.04
9	60	0.32	0.06	2.47	3.09
10	60	0.36	0.07	1.73	2.23
11	60	0.24	0.08	3.03	2.72
12	60	0.28	0.09	2.19	2.18
13	90	0.36	0.06	2.04	2.70
14	90	0.32	0.07	2.27	2.17
15	90	0.28	0.08	2.41	2.38
16	90	0.24	0.09	2.69	2.34

表3 抗拉强度方差分析结果
Table 3 Variance analysis results of tensile strength

方差来源	离差平方和S	自由度	平局离差平方和	F值	临界值
旧砂比例	0.193 71	3	0.064 57	9.67	4.76
层厚	4.348 45	3	1.449 48	217.18	
X方向分辨率	1.197 59	3	0.399 20	59.81	
误差	0.040 04	6	0.006 67	—	

表4 灼减量方差分析结果
Table 4 Variance analysis results of loss on ignition

方差来源	离差平方和S	自由度	平局离差平方和	F值	临界值
旧砂比例	0.131 03	3	0.043 68	3.89	4.76
层厚	0.938 54	3	0.312 85	27.9	
X方向分辨率	2.180 77	3	0.726 92	64.82	
误差	0.067 28	6	0.011 21	—	

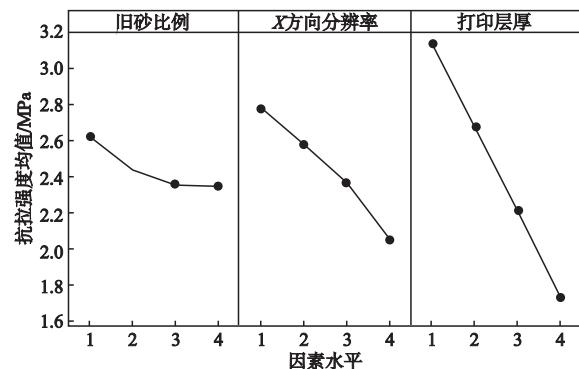
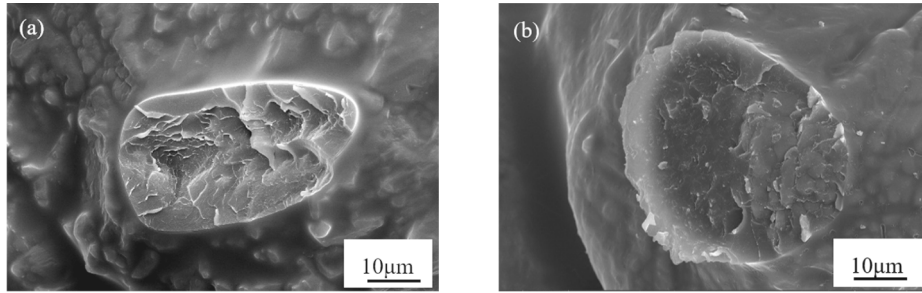


图4 抗拉强度主效应图

Fig. 4 Main effect diagram of tensile strength

下降,这是因为随着打印层厚的增大,层间粘结剂的渗透距离增大,使得粘结剂渗透的过程中消耗增大,层间的粘结桥变小,相邻层间的粘结强度下降;另一方面随着层厚的增加,型砂致密度下降,孔隙率增

大,曲率半径将减小,而且根据拉普拉斯方程^[12],附加压力值也将减小,因此使得毛细作用降低,粘结剂的渗透和扩散受到阻碍,不利于粘结桥的产生,抗拉强度下降。



(a) 内聚断裂

(b) 表面脱离的附着破裂

图5 粘结桥断裂形貌

Fig. 5 Micro-morphology of binder bridge fracture

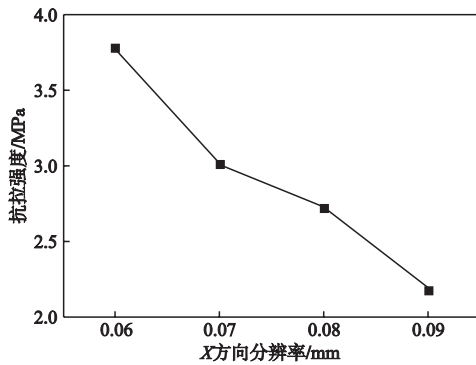


图6 X方向分辨率对抗拉强度的影响

Fig. 6 Effect of resolution in the X direction on tensile strength

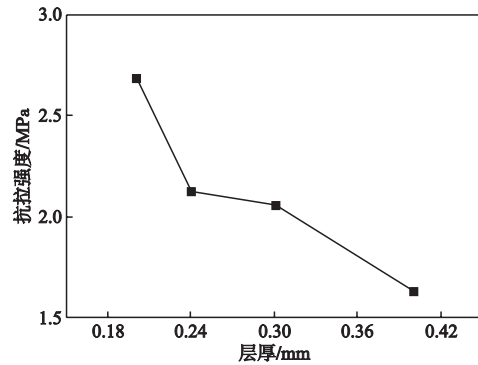


图7 打印层厚对抗拉强度的影响

Fig. 7 Effect of layer thickness on tensile strength

3 结论

(1) 通过正交试验的方法研究了旧砂比例、X方向分辨率、层厚对喷墨3D打印铸造型(芯)抗拉强度的影响,结果表明,层厚对抗拉强度的影响最大,X方向分辨率次之,旧砂比例的影响最小。最佳参数组合为:旧砂比例30%、X方向分辨率0.09 mm、层厚0.28 mm。

(2) 随着旧砂比例的增加,砂型强度逐渐降低,旧砂比例会影响砂粒与粘结剂间弱界面层的形成,从而影响强度大小;随着X方向分辨率的增大,强度下降;随着层厚的增加,强度也逐渐下降。X方向分辨率和层厚的变化都会影响砂粒间粘结桥的面积,从而对强度产生影响。

参考文献:

- [1] 王巍. 光固化快速成形在精密铸造中的应用 [J]. 铸造技术, 2012, 33 (1): 127-128.
- [2] 张学军, 唐思熠, 肇恒跃, 等. 3D打印技术研究现状和关键技术 [J]. 材料工程, 2016, 44 (2): 122-128.
- [3] 段望春, 高佳佳, 董兵斌, 等. 3D打印技术在金属铸造领域的研究现状与展望 [J]. 铸造技术, 2018, 39 (12): 275-280.
- [4] CONNER B P, MANOGHARAN G P, MARTOF A N, et al. Making sense of 3-D printing: creating a map of additive manufacturing products and services [J]. Additive Manufacturing, 2014 (1-4): 64-76.
- [5] WILLIAMS J D, DECKARD C R. Advances in modeling the effects of selected parameters on the SLS process [J]. Rapid Prototyping Journal, 1998, 4 (2): 90-100.
- [6] 杨伟东, 贾鹏飞, 马媛媛, 等. 3D打印工艺中粘结剂渗透建模与仿真 [J]. 纳米技术与精密工程, 2017 (4): 246-253.
- [7] JIANG Y Min, LIU Mario. Energetic instability unjams sand and suspension [J]. Physical Review Letters, 2004, 93 (14): 148001.
- [8] RAMAKRISHNAN R, GRIEBEL B, VOLK W, et al. 3D printing of inorganic sand moulds for casting applications [J]. Advanced Materials Research, 2014, 1018: 441-449.
- [9] YANG W D, SHI Z Q, LI L. Research on catalyst penetration process of patternless casting manufacturing technique [J]. Key Engineering Materials, 2014, 609-610: 1515-1520.
- [10] 张永年, 东野英. 弱界面层对树脂砂粘结桥附着力的影响机理研究 [J]. 天津大学学报, 1987 (4): 99-106.
- [11] 田乐, 沈其文, 魏青松, 等. 复杂铸造砂型(芯)3D打印关键工艺参数及材料的应用研究 [C] //2015中国铸造活动周论文集, 2015.

Application of Forming Process Parameters for 3D Printing Sand Mold and Core

GAO Gui-li^{1, 2, 3}, ZHANG Wei-kun¹, DU Zhi-min¹, LIU Qing-yi², NI Yun-qiang², SU Yan-qing³, SHI De-quan¹

(1. School of Materials Science & Engineering, Harbin University of Science & Technology, Harbin 150040, Heilongjiang, China; 2. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261000, Shandong, China; 3. School of Materials Science & Engineering Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang, China)

Abstract:

This work investigated the effects of the used sand proportion, forming process parameters (print-layer thickness and resolution in the *X* direction) on the tensile strength of the mold/core by means of the orthogonal experiment method. The results show that the tensile strength of the samples decreases with increasing the used sand proportion, and the tensile strength and loss on ignition gradually decrease with increasing the layer thickness. The resolution in the *X* direction is related to the binder content, and with decreasing the resolution, the binder content increases, and thus both the tensile strength and loss on ignition also increase. In addition, the layer thickness has significantly stronger influence on the tensile strength, following by the resolution in the *X* direction and the used sand proportion. The optimal parameters are 30% used sand, 0.28 mm layer thickness, and 0.09 mm resolution in the *X* direction. The mold/core printed using the optimal parameters can meet the requirements well.

Key words:

casting mold/core; 3DP print; tensile strength; loss on ignition