DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.06.005

3D 打印用精密铸造粉末材料性能影响因素的研究

严生辉,李天才,张　璐,杨　洋
(共享智能铸造产业创新中心有限公司,宁夏 银川 750021)

摘　要:通过正交试验研究了耐火材料粉末种类、粉末目数、助熔剂种类、焙烧温度对 3D 打印用精密铸造粉末的高温抗压强度、高温抗拉强度、尺寸收缩率、表面粗糙度的影响。结果表明,确定的 3D 打印用精密铸造粉末的最终材料为添加氧化铜的 325 目锆英粉在 1 400 ℃下焙烧得到抗压强度为 45.42 MPa、抗拉强度 6.78 MPa、尺寸收缩率为 6%、表面粗糙度 *Ra* 为 3.45 的高性能型壳。

关键词:3D 打印;耐火材料粉末种类;粉末目数;助熔剂种类;焙烧温度

中图分类号:TG249　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)06-0525-05

Study on the Influencing Factors of the Properties of Precision Casting Powder Materials for 3D Printing

YAN Shenghui, LI Tiancai, ZHANG Lu, YANG Yang
(National Intelligent Foundry Innovation Center Co., Ltd., Yinchuan 750021, China)

Abstract: The influences of refractory powder types, mesh number of powders, flux types and calcination temperature on the high temperature compressive strength, high temperature tensile strength, size shrinkage and surface roughness of precision casting powder for 3D printing were studied by orthogonal experiment. The results show that the final materials of 3D-printing precision casting powder is 325-mesh zirconia powder with copper oxide and roasted at 1 400 ℃ to obtain a high-performance shell with compressive strength of 45.42 MPa, tensile strength of 6.78 MPa, dimensional shrinkage rate of 6% and surface roughness *Ra* of 3.45.

Key words: 3D printing; types of refractory powder; mesh number of powder; flux type; calcination temperature

3D 打印技术又称为增材制造技术或 3D 快速成型技术,是一种以三维模型为基础,采用粉末或丝材等离散材料,通过逐层堆叠累积的方式来制造任意复杂形状物体的技术[1-4]。目前,3D 打印在铸造领域常用的技术有:熔融沉积快速成型技术(Fused Deposition Modeling, FDM)、光固化成型技术(Stere-o Lithography Appearance,SLA)、选择性激光烧结技术(Selective Laser Sintering, SLS)、无模铸型制造技术(Patternless Casting Manufacturing, PCM)、基于 3D 打印的直接壳型铸造技术(Direct Shell Produc-tion Casting, DSPC)[5]、立体喷墨打印(Three-Dimension Printing, 3DP)它是一种以数字模型文件为基础,运用粉状金属、塑料、陶瓷、砂、碳化硅粉、石膏材料等可粘合材料,通过逐层喷射粘合剂的打印方式来构造物体的技术。

熔模精密铸造是铸造行业中一项优异的技术,其铸件尺寸精度高、表面质量好、能制造复杂结构铸件,应用范围较广,尤其是在高端铸件制造方面具有独特的优势[6]。但是,由于熔模精密铸造工艺包含模具制造、蜡模制作、多层挂浆撒砂、多层固化、高温焙烧、最后浇铸、铸件后处理等多道工艺,其过程复杂且制造周期长,目前已无法满足现代社会对企业产品多样化和市场快速响应的需求。

快速熔模精密铸造技术(简称快速铸造技术)就是将 3D 打印技术与熔模精密铸造工艺相结合,采用 3D 打印原型替代传统的蜡模作为熔模,在其基础上直接制作型壳,再高温焙烧去除 3D 打印原型,即可进行铸件浇注成形,该技术可有效缩短零件开发周期、降低生产成本,应用前景广阔[7],但此技术只能解决熔模精密铸造中的第一步,其工作流程依然繁多,无法根本解决生产效率问题。

直接 3D 打印金属铸件:使用选择性激光烧结成型(SLS)技术并选用需要的金属粉末,按照设计好的三维零件图形逐层打印出金属材质的零件,主要是通过激光源提供能量来使得金属粉末烧结成型,然后在经过一些后处理得到金属材质的零件[8]。这种方案有一定的缺陷:金属粉末烧结成型零件的

收稿日期:2020-03-19

作者简介:严生辉(1992-),宁夏中卫人,助理工程师,学士.主要从事 3D 打印材料及表面处理的研发及应用方面的工作.电话:15296971183,E-mail:1758769105@qq.com

强度和精度很难达到理想的要求，而且每个零件都是单独打印的，产品的一致性差[9]。

3D 打印砂型：使用三维打印成型(3DP)技术并选用合适的砂质粉末材料，根据三维零件设计出来的三维模具图形逐层打印出砂质材料的模具型壳，刚打印好的型壳强度不高，需要用热风或微波加热一段时间来提高强度，然后用打印的型壳结合传统的覆膜砂铸造工艺生产出铸件[10]。这个工艺方案虽然解决了产品的内部组织和强度方面的缺陷，但是零件的表面质量差和产品一致性差的问题依然存在[11]。

本论文主要研究一种可用于 3D 打印精密铸造用粉末材料，可直接用于打印成型精度较高的型壳，用于焙烧浇铸。本文主要探究耐火材料粉末种类、粉末目数、助熔剂种类、型壳焙烧温度度对 3D 打印精密铸造型壳的高温抗拉强度、高温抗压强度、尺寸收缩率、表面粗糙度的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

锆英粉，200、325、400 目；白刚玉，200、325、400 目；熔融石英，200、325、400 目；氧化铋助熔剂，325 目；氧化铜助熔剂，325 目；氧化镁助熔剂，325 目。

1.2 实验方法

3D 打印用精密铸造粉末材料的制备工艺包括如下步骤：

(1)将粉末材料、助熔剂按一定量依次加入到罐式混料机中，以直径为 ϕ8～15 的氧化锆实心球体为球磨介质、球磨介质添加量与粉末材料的质量比为 1:5～1:8 以及搅拌转速为 200～500 r/min 的条件下，球磨 1.0～2.5 h，使各种粉料充分混合均匀，制得初级精密铸造用耐火材料。

(2)将初级精密铸造耐火材料放置在真空干燥箱内进行热干处理，干燥温度为 120～140 ℃温度，干燥时间为 3～5 h；然后 200 目筛网过滤，即得到成型的精密铸造耐火材料。

(3)本实验采用控制变量法探究耐火材料目数、焙烧温度、耐火材料种类、助熔剂种类对其产品的高温抗压强度、高温抗拉强度、尺寸收缩率、表面粗糙度的影响，从而确定耐火材料种类及目数、助熔剂的添加型号及焙烧温度工艺。

1.3 正交实验方案设计

本正交实验不考虑各因素间的交互作用，选取 4 因素 3 水平正交实验方案，选用 L9(3^4)正交表，确定工艺及综合性能较佳的 3D 打印用精密铸造粉末材料的材料类型、目数、焙烧温度及助熔剂型号。正交实验因素水平见表 1，正交实验方案见表 2。

表 1 正交实验因素水平表

Tab.1 The table of factors and levels of orthogonal experiment

因素	粉末种类(A)	粉末目数(B)	助熔剂种类(C)	焙烧温度(D)
水平 1(T1)	锆英粉	200	氧化铋	1 000 ℃
水平 2(T2)	白刚玉	325	氧化铜	1 200 ℃
水平 3(T3)	熔融石英	400	氧化镁	1 400 ℃

表 2 正交实验方案

Tab.2 Project of orthogonal experiment

实验号	粉末种类	粉末目数	助熔剂种类	焙烧温度
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

2 结果与讨论

正交实验结果见表 3，正交实验数据极差分析见表 4。

表 3 正交实验结果

Tab.3 Results of orthogonal experiment

实验号	高温抗压强度 /MPa	高温抗拉强度 /MPa	尺寸收缩率 (%)	表面粗糙度 *Ra*
1	20.23	3.08	3.98	6.45
2	28.94	4.32	5.84	4.24
3	32.45	4.96	5.16	4.85
4	23.57	3.86	5.26	6.23
5	14.86	2.18	3.24	8.34
6	18.52	2.86	4.12	7.32
7	12.85	1.93	2.90	9.23
8	16.56	2.57	3.62	6.12
9	15.45	2.43	3.14	7.43

2.1 高温抗压强度的影响因素

材料打印成型焙烧后的抗压强度值与主体材料的密度、热膨胀系数、熔点、化学性质及粉末的目数、焙烧温度、助熔剂种类等有密切关系。目前不添加助熔剂其常温抗压强度较小，打印产品很容易破损，受目前树脂加入量影响，需要粉末有较高的密度，并且与树脂混合后具有一定的初始强度以达到搬运的要求。

由表 4 中极值 R 的大小可见：实验中各因素对粉末材料的高温抗压强度的影响大小顺序为：材料种类＞焙烧温度＞助熔剂种类＞粉末目数。其

表 4 正交实验数据极差分析表

Tab.4 The range analysis of orthogonal experiment data

测试性能		粉末种类 (A)	粉末目数 (B)	助熔剂种类(C)	焙烧温度 (D)
高温抗压强度 /MPa	T1	27.21	18.88	18.44	16.85
	T2	18.98	20.12	22.65	20.10
	T3	14.95	22.14	20.05	24.19
	R	12.25	3.26	4.22	7.35
高温抗拉强度 /MPa	T1	4.120	2.957	2.837	2.563
	T2	2.967	3.023	3.537	3.037
	T3	2.310	3.417	3.023	3.797
	R	1.810	0.460	0.700	1.233
尺寸收缩率(%)	T1	0.049 93	0.040 47	0.039 07	0.034 53
	T2	0.042 07	0.042 33	0.047 47	0.042 87
	T3	0.032 20	0.041 40	0.037 67	0.046 80
	R	0.017 73	0.001 87	0.009 80	0.012 27
表面粗糙度 *Ra*	T1	5.180	7.303	6.630	7.407
	T2	7.297	6.233	5.967	6.930
	T3	7.593	6.533	7.473	5.733
	R	2.413	1.070	1.507	1.673

中，材料种类、焙烧温度对产品高温烧结强度影响较大，锆英粉与高的焙烧温度能够极大的提升产品的高温抗压强度，降低铸造产品的缺陷。采用 Minitab 软件进行数据主效应绘图分析，能更直观地反映出各因素对 3D 打印用精密铸造粉料高温抗压强度的影响趋势，见图 1。

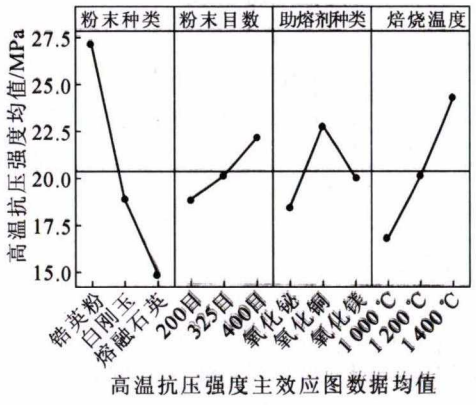


图 1 各因素对精密铸造型壳高温抗压强度的影响

Fig.1 Influence of various factors on high temperature compressive strength of precision cast shell

考虑到粉末材料生产的产品初始抗压强度及树脂加入量的影响，还可以选择合适的氧化铋、氧化镁、氧化铜助熔剂及符合要求 200、325、400 目目数的粉末调整其高温抗压强度值，使型壳达到浇铸要求。

2.2 高温抗拉强度的影响因素

材料成型后焙烧后的抗拉强度值与主体材料的密度、热膨胀系数、熔点、化学性质及粉末的目数、焙烧温度、助熔剂种类等有密切关系。目前不添加助熔剂其常温抗拉强度较小，打印产品很容易破损，受目前树脂加入量影响，需要粉末有较高的密度，并且与树脂混合后具有一定的初始抗拉强度以达到搬运的要求。

由表 4 中极值 R 的大小可见：实验中各因素对粉末材料的高温抗拉强度的影响大小顺序为：材料种类>焙烧温度>助熔剂种类>粉末目数。其中，材料种类、焙烧温度对产品高温烧结强度影响较大，锆英粉与高的焙烧温度能够极大的提升产品的高温抗拉强度，降低铸造产品的缺陷。采用 Minitab 软件进行数据主效应绘图分析，能更直观地反映出各因素对 3D 打印用精密铸造粉料高温抗拉强度的影响趋势，见图 2。

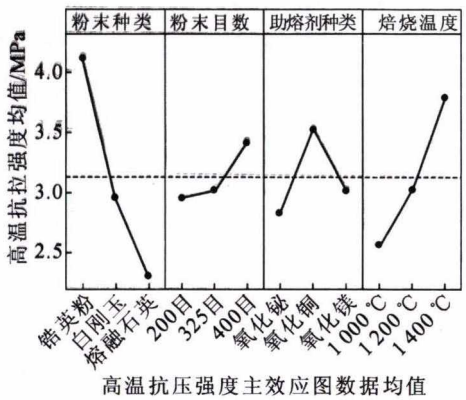


图 2 各因素对精密铸造型壳高温抗拉强度的影响

Fig.2 Influence of various factors on high temperature tensile strength of precision cast shell

考虑到粉末材料生产的产品初始抗拉强度及树脂加入量的影响，还可以选择合适的氧化铋、氧化镁、氧化铜助熔剂及符合要求 200、325、400 目目数的粉末调整其高温抗拉强度值，使型壳达到浇铸要求。

2.3 尺寸收缩率的影响因素

材料成型后焙烧后尺寸收缩率与主体材料的密度、热膨胀系数、熔点、化学性质及温度、助熔剂种类、粉末的目数、材料粒度分布等有密切关系，其主要的还是受主体材料的影响较大。

由表 4 中极值 R 的大小可见：实验中各因素对粉末材料的尺寸收缩率的影响大小顺序为：材料种类>焙烧温度>助熔剂种类>粉末目数。其中，材料本身影响较大(熔融石英<白刚玉<锆英粉)，焙烧温度越高其收缩率越大，产品你越致密，强度也越高。采用 Minitab 软件进行数据主效应绘图分析，能更直观地反映出各因素对 3D 打印用精密铸造粉料高温尺寸收缩率的影响趋势，见图 3。

其尺寸收缩率的大小，还可以选择合适的氧化铋、氧化镁、氧化铜助熔剂及符合要求 200、325、400 目目数的粉末调整其尺寸收缩率。

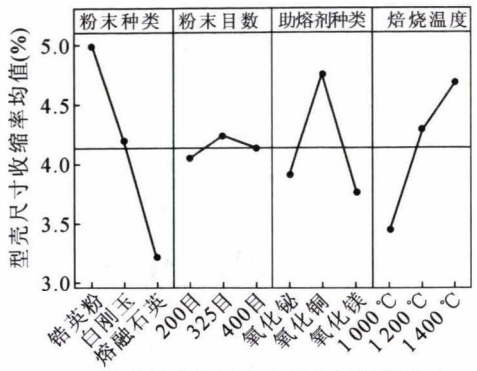


图 3 各因素对精密铸造型壳尺寸收缩率的影响

Fig.3 Influence of various factors on size shrinkage rate of precision casting shell

2.4 表面粗糙度的影响因素

材料成型后的表面粗糙度与主体材料的密度、热膨胀系数、熔点、化学性质及温度、助熔剂种类、粉末的目数、材料粒度分布等有密切关系，其主要受主体材料及烧结温度的影响较大。

由表 4 中极值 R 的大小可见：实验中各因素对粉末材料成型的表面粗糙度的影响大小顺序为：材料种类>焙烧温度>助熔剂种类>粉末目数。其中，材料本身影响较大(熔融石英<白刚玉<锆英粉)，焙烧温度越高其表面精度越高，浇铸出的产品越精细。采用 Minitab 软件进行数据主效应绘图分析，能更直观地反映出各因素对 3D 打印用精密铸造粉料表面粗糙度的影响趋势，见图 4。

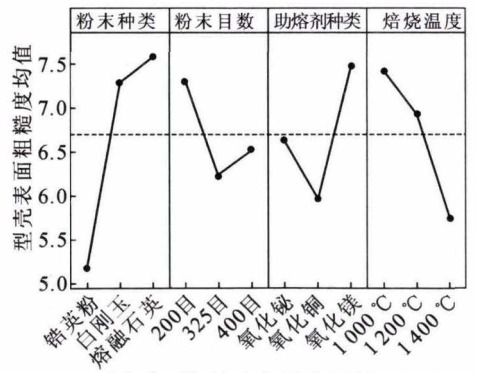


图 4 各因素对精密铸造型壳表面粗糙度的影响

Fig.4 Influence of each factor on the surface roughness of precision cast shell

其尺寸表面粗糙度数值的大小，还可以选择合适的氧化铋、氧化镁、氧化铜助熔剂及符合要求 200、325、400 目目数的粉末调整表面粗糙度。

2.5 3D 打印用精密铸造粉末材料及烧结温度确定

根据上述的极差分析和各因素对 3D 打印用精密铸造粉末材料的影响结果，确定粉末主体材料的种类、目数、焙烧温度以及助熔剂的添加种类。选取各因素的最佳水平与实验指标有关。实验指标以大为好者，就应取 T1、T2、T3 中最大的那个水平；反之，试验指标以小为好者，就应取 T1、T2、T3 中最小的那个水平。在 3D 打印用精密铸造粉末材料性能影响因素的 4 个主要指标中，高温抗拉强度、高温抗压强度要求最大，表面粗糙度要求要小，尺寸收缩率要小；则应选 T1、T2、T3 中高温抗压强度的水平为 A1B3C2D3；则应选 T1、T2、T3 中高温抗拉强度水平为 A1B3C2D3；选 T1、T2、T3 中表面粗糙度水平为 A1B2C2D3；选 T1、T2、T3 中尺寸收缩率水平为 A3B1C3D1。为得到综合性能最佳的 3D 打印用精密铸造粉末材料性能影响的主要因素及焙烧工艺，并验证正交实验结果的准确性，进行第二轮试验，见表5。

表5 第二轮实验结果

Tab.5 The The second experimental result

实验号	实验组合	高温抗压强度 /MPa	高温抗拉强度 /MPa	尺寸收缩率(%)	表面粗糙度 *Ra*
10	A1B3C2D3	43.23	6.45	6.2	3.76
11	A1B3C2D3	43.23	6.45	6.2	3.76
12	A3B1C3D1	17.56	2.82	2.7	10.14
13	A1B2C2D3	45.42	6.78	6.0	3.45

由表 5 可见：第 10、11 组实验的高温抗压、抗拉强度满足要求；第 11 组尺寸收缩率满足要求，但抗拉强度、抗压强度及表面粗糙度无法满足要求；第 10、11、13 组实验的表面粗糙度满足要求并且其抗拉强度、抗压强度也满足要求。综合以上分析，可确定第 13 组试验为最佳的方案。所用的材料为添加氧化铜的 325 目锆英粉经过 3D 打印成型壳体，放入 1 400 ℃的环境中烧结成陶瓷型的壳体用于浇铸。

3 结语

(1)通过正交实验和极差分析，得到了材料型号、粉末目数、助熔剂种类、焙烧温度对 3D 打印用精密铸造粉末材料的高温抗压强度、高温抗压强度、尺寸收缩率、表面粗糙度的影响顺序。

(2)通过正交实验，确定了 3D 打印用精密铸造粉末材料的最终材料类型、材料目数、助熔剂的添加类型、焙烧工艺温度。为后期粉末的配方确定了主体方向。

参考文献：

[1] 卢秉恒，李涤尘. 增材制造(3D 打印)技术发展[J]. 机械制造与自动化，2013，42(4): 1-4.

[2] 李涤尘，卢秉恒，赵万华. 快速成形的未来发展快速产品制造[J]. 航空制造技术，2004(5): 48-49.

(下转第 532 页)

进行脱氧。除去叶片的熔炼量2017和2018年熔炼量分别为18 374 t、21 669 t,均值为19 772 t。

根据表5可得钢芯铝较铝锭节约成本13.3元/t钢液；结合表4按共享铸钢2017和2018年熔炼量均值19 772 t(除叶片),可节约26.3万元/年。

根据表6可得钢芯铝较铝锭节约成本12.5元/t钢液；结合表4按共享铸钢2017和2018年熔炼量均值19 772 t(除叶片),可节约24.7万元/年。

4 试验结论

共享铸钢结合自身生产条件,对铸造炼钢钢芯铝脱氧进行了深入试验与实践。

(1)与原铝锭脱氧相比,钢芯铝具有用量调整灵活、加入方便、减轻职工劳动强度的优点。

(2)铝锭LF氧活性是钢芯铝的1.9倍;Al回收率仅为钢芯铝是0.74倍,证明钢芯铝脱氧效果明显。

(3)按历年熔炼量两种计算方法,每年节约的成本在24.7~26.3万元。

综上考虑，在现有条件下采用钢芯铝代替铝锭优化铸造炼钢钢脱氧是可行、成功的。

5 结束语

钢芯铝相比较铝锭脱氧效果更加明显；通过试验分析，钢芯铝对含碳量要求不高的铸造炼钢从脱氧效果、降低成本有很大的优势;在铸造业中利润极低的情况下,可以为企业一定程度的降低成本;从而为企业直接或间接的减负增产。

参考文献：

[1] 夏长松,李小强,谢杰智. 钢芯铝在在转炉炼钢中的应用[J]. 南方金属,2011(2): 53-55.

[2] 王唐林,宋波,宋明明,等. 新型Al基复合脱氧剂脱氧效果研究[J]. 工程科学学报,2015,37(5): 568-572.

[3] 李双江,李阳,李杰,等. 炼钢用脱氧剂的性能及应用现状[J]. 河北冶金,2014(10): 45-48.

[4] 郑良才,彭勇生,张建华. 杭钢电炉钢脱氧剂的选择及相关工艺改进[J]. 浙江冶金, 2004(4): 10-12.

[5] 吴勉华. 转炉炼钢500问[M]. 北京: 中国计量出版社, 1992.

(上接第528页)

[3] Bahnini I, Rivette M, Rechia A, et al. Additive manufacturing tech-nology: the status, applications, and prospects [J]. InternationalJournal of Advanced Manufacturing Technology, 2018,(2): 1-15.

[4] L Guo, J Qiu. Combination of cloud manufacturing and 3D print-ing: research progress and prospect [J]. International Journal of Ad-vanced Manufacturing Technology, 2018, 1-14.

[5] Kang J W, Ma Q X. The role and impact of 3D printing technolo-gies in casting[J]. china foundry, 2017, 14(3):157-168.

[6] 吕志刚. 我国熔模精密铸造的历史回顾与发展展望 [J]. 铸造, 2012,61(4):347-356.

[7] 张敏华. 快速铸造技术的研究与发展[J]. 铸造技术,2009,30(2): 292-294.

[8] 李栋,原晓雷,孟庆文. 3D打印技术在高端铸件研发中的创新应用[J]. 工业技术创新, 2017(4): 67-70.

[9] 傅骏,王泽忠,方辉,等. 3D打印技术及其在铸造中应用现状与发展展望[J]. 中小企业管理与科技, 2014 (9): 299-300.

[10] Walker J, Harris E, Lynagh C, et al. 3D Printed Smart Molds for Sand Casting [J]. International Journal of Metalcasting, 2018(3): 1-12.

[11] 蔡志楷, 梁家辉. 3D打印和增材制造的原理原理及应用 (陈继明,陈晓佳)[M]. 北京:国防工业出版社, 2017.

技术资料邮购

《铸件均衡凝固技术及应用实例》

本书由西安理工大学魏兵教授编著。共8章：1、铸铁件均衡凝固与有限补缩；2、铸铁件冒口补缩设计及应用；3、压边浇冒口系统；4、浇注系统大孔出流理论与设计；5、铸件均衡凝固工艺；6、铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺；7、浇注系统当冒口补缩设计方法；8、铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书320页。

特快专递邮购价：226元。

邮购咨询：李巧凤　　电话/传真：029-83222071　　技术咨询：13609155628