● 特种铸造 Special Casting ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.06.010

3D 打印熔模精密铸造模样燃烧特性对比研究

乔海滨,袁兵兵,孙宏喆,杨 光,刘茵琪

(洛阳双瑞精铸钛业有限公司,河南 洛阳 471000;中国船舶集团公司 第七二五研究所,河南 洛阳 471023)

摘 要:对 3 种 3D 打印模样的燃烧特性进行了对比研究,从灰分残留、燃烧物形态及快速燃烧温度区间 3 个方面探究了 SLA 模制作的钛合金铸件表面掉渣缺陷多的原因。结果表明,SLA 模的灰分残留多于 PS 粉模和 PMMA 粉模;SLA 模燃烧后始终以固体残屑形式存在,进而导致灰分残留加剧,而 PS 粉模和 PMMA 粉模可以熔化流失,因而灰分残留较少;同时 SLA 模快速燃烧温度区间较宽,因而不易快速燃烧,使模壳胀裂破损风险加大。

关键词:3D 打印;灰分;燃烧物;快速燃烧

中图分类号:TG249 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2020)06-0544-04

Comparative Study on Combustion Characteristics of 3D Printed Patterns for Investment Casting

QIAO Haibin, YUAN Bingbing, SUN Hongzhe, YANG Guang, LIU Yinqi

(Luoyang Sunrui Titanium Precision Casting Co., Ltd., Luoyang 471000, China; Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471023, China)

Abstract: The combustion characteristics of three kinds of 3D-printed patterns were compared, and the reasons for more slag dropping defects on the surface of titanium alloy castings made by SLA model were explored from three aspects of ash residue, combustor morphology and fast combustion temperature range. The results show that the ash residue of SLA mold is more than that of PS and PMMA powder pattern. After SLA mold combustion, it always exists in the form of solid debris, which leads to the aggravation of ash residue, while PS and PMMA powder pattern can melt and lose, so ash residue is less. At the same time, SLA mold rapid combustion temperature range is relatively wide, so it is not easy to burn quickly, which increases the risk of mold shell bursting and cracking.

Key words: 3D printing; ash residue; combustor morphology; the rapid combustion

目前,3D 打印模样在钛合金精铸件中的应用越来越广泛[1]。对于单件、小批量、不易开金属模具的铸件来说,该方法优势明显,能够快速、精确地制造出任意复杂的零部件模型,大大缩短新产品研制的周期。3D 打印模样虽然成型的原理基本相同,即采用分层切片技术将 CAD 模型逐层打印出来,但其打印方式及使用的材料却各不相同[2],同时在模样质量、成本和交货期方面也各具优势。

目前本公司已使用的 3D 打印模样主要有 3 种:光敏树脂模(SLA 模)、聚苯乙烯模(PS 粉模)和有机玻璃模(PMMA 粉模)。在实际生产中 3 种模样在燃烧特性上有所不同,进而导致制作的铸件掉渣倾向各不相同[3]。为了探究上述问题的主要原因,本文对 3 种 3D 打印模样的燃烧特性进行了对比研究,以便发挥各自优势,更好的应用于精铸件的实际生产中。

1 研究方法

1.1 灰分的对比研究

测试设备:40 mL 的陶瓷坩埚;精度为 0.000 1 g 的电子天平;加热温度范围为 0～1 000 ℃的箱式电阻炉。

测试方法:依据《HB 5350.5-2004 熔模铸造模料性能试验方法 第 5 部分:灰分的测定》进行试验。定义灰分值 F 如下:

$$F=\frac{(C-A)}{B}\times 100\% \quad (1)$$

式中,A 为经过清洗、焙烧后的陶瓷坩埚重量(g);B 为模料重量(g),保证 3 次连续称量的差数≤0.000 4 g;C 为经过 850 ℃焙烧 1 h 后盛有灰分的陶瓷坩埚重量(g)。

1.2 燃烧物形态的对比研究

测试设备:40 mL 的陶瓷坩埚;加热温度范围为

收稿日期:2020-03-19

基金项目:郑洛新自创区产业集群专项(181200212500)资助

作者简介:乔海滨(1987-),河南许昌人,硕士,工程师.主要从事钛合金熔模精密铸造方面的工作.

电话:15138775040,Email:qhbnwpu@163.com

0～1 000 ℃的箱式电阻炉。

测试方法：取适量 3 种模样放入箱式电阻炉中，记录模料在 300~500 ℃的燃烧物形态。试验过程中升温速率为 10 ℃/min。

1.3 快速燃烧温度区间的对比研究

测试设备：40 mL 的陶瓷坩埚；热重分析仪。

测试方法：采用热重分析仪获得 SLA 模和 PS 粉模在 1 000 ℃以下的 TGA 曲线，试验过程中升温速率为 30 ℃/min。

2 结果与分析

2.1 灰分的对比测试结果

表 1 为 850 ℃焙烧 1 h 后 3 种模样 3 次平行试验的灰分值。从表中数据可见，SLA 模、PS 粉模和 PMMA 粉模的平均灰分残留分别为 0.091%、0.024%和 0.021%。可见灰分残留由多到少的次序依次为 SLA 模、PS 粉模和 PMMA 粉模。PS 粉模和 PMMA 粉模的灰分残留基本相当，而 SLA 模是上述两者的 3~4 倍。

表 1 3 次平行试验的灰分值

Tab.1 Ash value of three parallel tests

蜡型	编号	F(%)	平均
SLA 模	1#	0.105 2	0.091
	2#	0.082 2	
	3#	0.085 6	
PS 模	1#	0.025 5	0.024
	2#	0.023 2	
	3#	0.023 0	
PMMA 模	1#	0.021 6	0.021
	2#	0.020 9	
	3#	0.021 3	

2.2 燃烧物形态的对比结果

图 1(a)~ 图 1(e)分别代表 SLA 模在 300、350、400、450、500 ℃的燃烧过程。可以看出，随着温度的升高模样逐渐变黑、分解；500 ℃剧烈燃烧后以固体残屑形式存在，如图 1(f)所示。这是由于 SLA 模属于热固性塑料[4]，燃烧时只能软化而不能熔化流失，这也是其灰分残留较多的主要原因之一。

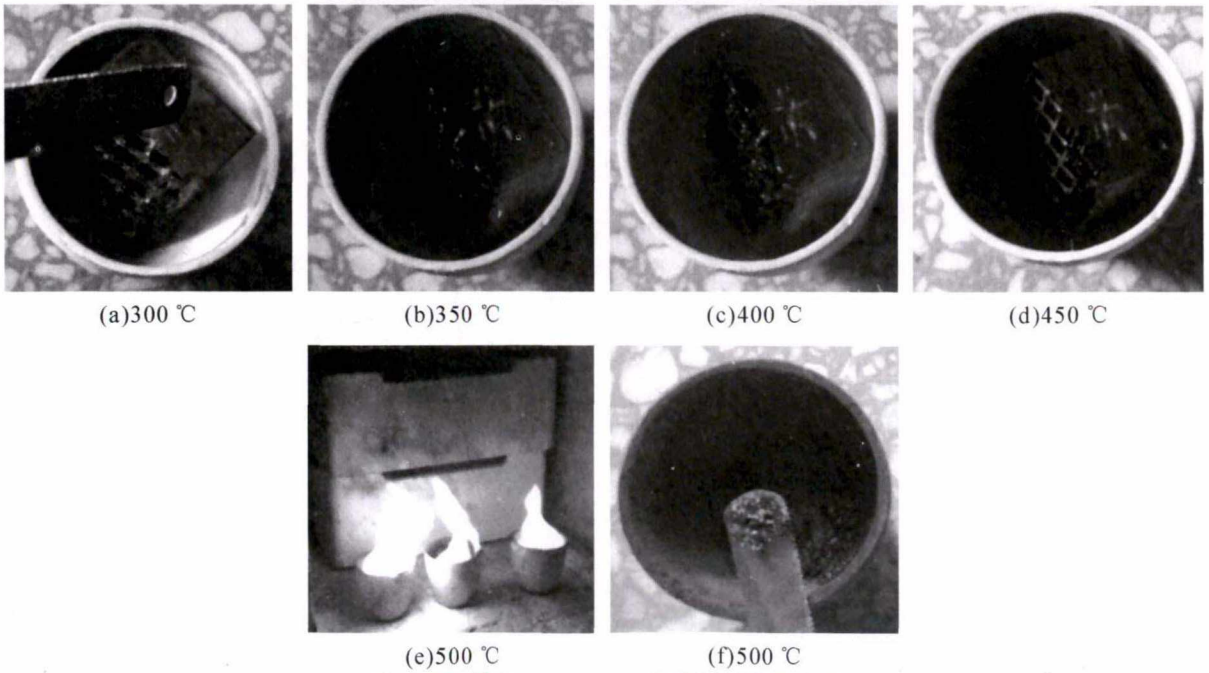
图 2(a)~(e)分别代表 PS 粉模在 300、350、400、450、500 ℃的燃烧过程。可见，300 ℃时模样逐渐软化坍塌，如图 2(a)所示。到 400 ℃呈熔融状，并开始伴有气泡产生，如图 2(c)所示。500 ℃剧烈燃烧后的残留物以液态存在，如图 2(f)所示。可见 PS 粉模最终以液态熔融状的形式存在，能够沿着排料孔流出，从而减少了其在模壳内的残留。

图 3(a)~(e)分别代表 PMMA 粉模在 300、350、400、450、500 ℃的燃烧过程。可见，对于 PMMA 粉模而言燃烧过程同 PS 粉相似，同样以液态熔融状的形式存在，并可沿着排料孔流出，如图 3(f)所示。

2.3 快速燃烧温度区间的对比结果

图 4 为 SLA 模的热重分析曲线，可以看出 SLA 模在 100 ℃时开始缓慢分解，300 ℃时开始剧烈分解，600 ℃时基本分解完成。由此可见，SLA 模的快速燃烧温度区间在 300 ~600 ℃的温度范围内。

图 5 为 PS 粉模的热重分析曲线，可以看出 PS 粉模在 300 ℃时开始缓慢分解，400 ℃时开始剧烈分解，460 ℃时已经分解完成。PS 粉模的快速燃烧

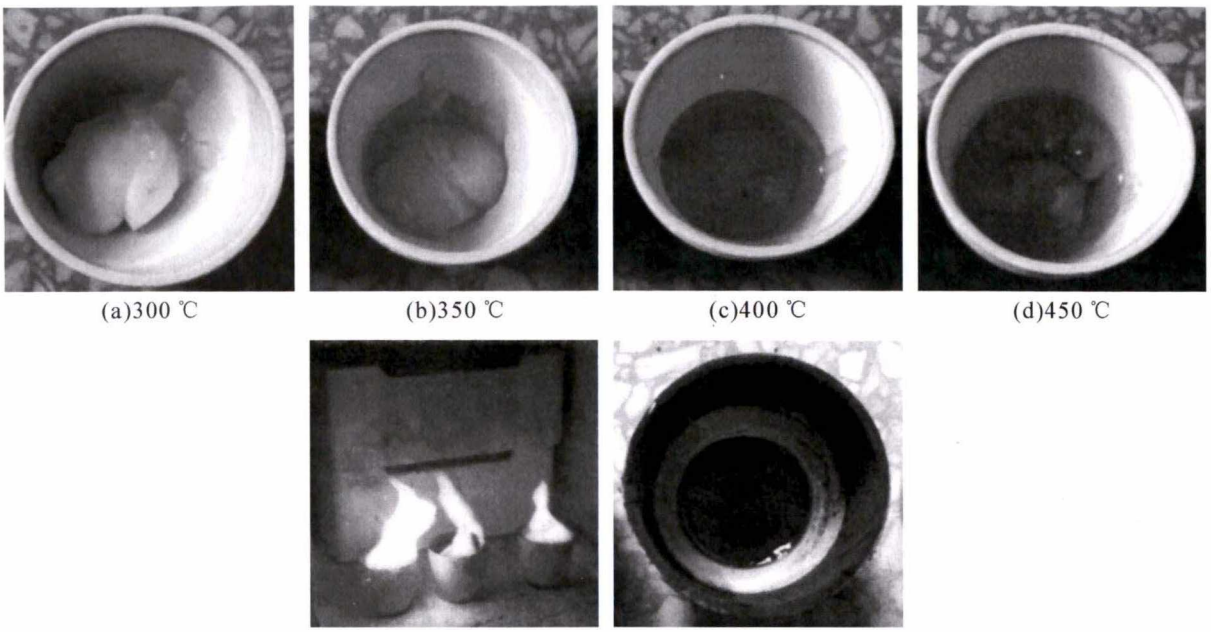


(a)300 ℃　(b)350 ℃　(c)400 ℃　(d)450 ℃

(e)500 ℃　(f)500 ℃

图 1 SLA 模在 300～500 ℃温度下的燃烧过程

Fig.1 The burning process of SLA pattern from 300 ℃ to 500 ℃

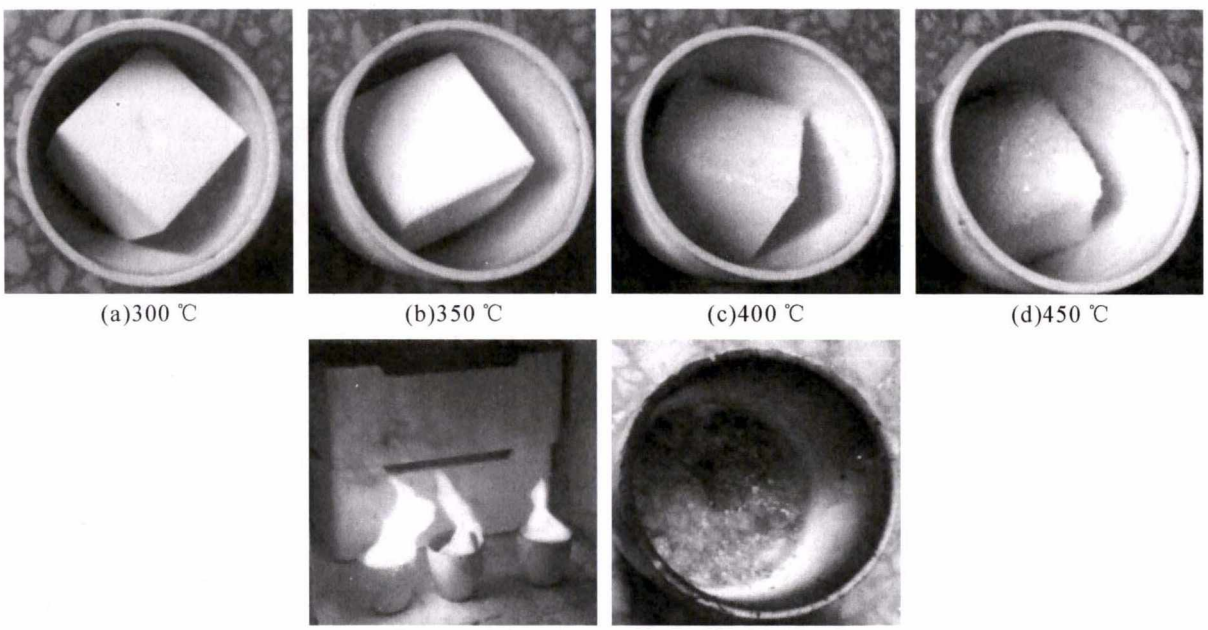


(a)300 ℃　(b)350 ℃　(c)400 ℃　(d)450 ℃

(e)500 ℃　(f)500 ℃

图 2 PS 粉模在 300～500 ℃温度下的燃烧过程

Fig.2 The burning process of PS pattern from 300 ℃ to 500 ℃



(a)300 ℃　(b)350 ℃　(c)400 ℃　(d)450 ℃

(e)500 ℃　(f)500 ℃

图 3 PMMA 粉模在 300～500 ℃温度下的燃烧过程

Fig.3 The burning process of PMMA pattern from 300 ℃ to 500 ℃

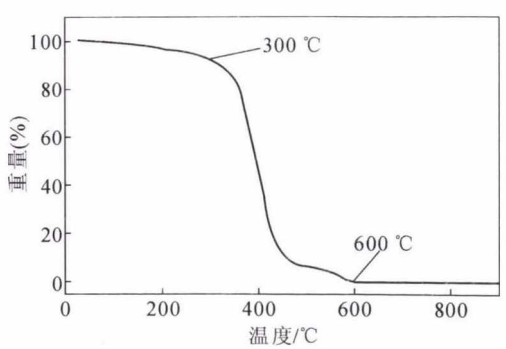


图 4 SLA 模热重分析曲线

Fig.4 The TGA curve of SLA pattern

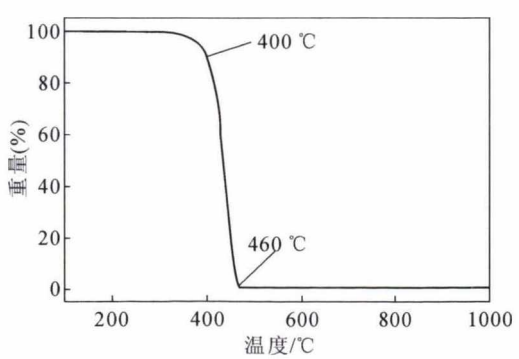


图 5 PS 粉模热重分析曲线

Fig.5 The TGA curve of PS wax

温度区间在 400～460 ℃的温度范围内。相比而言，PS 粉模快速分解的温度区间远远小于 SLA 模的。因而在模壳焙烧时，由于型壳材料的热膨胀系数比模样小 1～2 个数量级[5]，因而相比于 SLA 模来说，PS 粉模的快速燃烧使得模样膨胀力作用在模壳上的时间更短，因而模壳胀裂、破损风险变小。

综上可见，灰分残留多、燃烧物不易熔化流失和快速燃烧温度区间宽是 SLA 模制作的钛合金铸件表面掉渣缺陷多的 3 大主要原因。因此，在实际生产中可以采用增加排气孔数量、加快空气流通以促进燃烧[6]、焙烧后清理模壳灰分残留等多种措施来消除上述不利影响，从而获得高质量的钛合金铸件。

2.4　3 种 3D 打印模样的对比

3 种 3D 打印模样成型方式、技术特点及成本对比情况如表 2 所示。可见，SLA 模采用液体激光固化成型方式，虽然存在成本高和掉渣风险大的问题，但其制作的铸件尺寸精度高，可以达到 CT7 级，铸件表面粗糙度低，R_a 可以达到 3.2 μm。而 PS 粉模和 PMMA 粉模的成型方式分别为颗粒烧结和颗粒粘结，虽然成本低、掉渣风险小，但尺寸精度和表面粗糙度均不及 SLA 模。因此 3 种打印方式各有优势，在实际生产中需要综合考虑尺寸精度、表面粗糙度和成本方面的因素以便选择适合的打印方式。

表2 3种打印方式对比

Tab.2 The comparison of three printing methods

模样类型	成型方式	尺寸精度	粗糙度 /μm	成本 / 元·cm^3
SLA	液体激光固化	～CT7	～3.2	4～6
PS 粉	颗粒烧结	～CT8	～6.3	2～3
PMMA 粉	颗粒粘结	～CT8	～6.3	2～3

3　结论

(1)3 种 3D 打印模样的灰分残留由高到低依次为 SLA 模、PS 粉模和 PMMA 粉模。

(2)燃烧过程中 SLA 模始终以固态残屑形式存在，导致 SLA 模灰分残留加剧；PS 粉模和 PMMA 粉模可以熔化流失，灰分残留更少。

(3)SLA 快速燃烧温度区间比 PS 粉模和 PMMA 粉模的宽，更不易快速燃烧。

(4)3 种打印方式各有优势，在实际生产中需要综合考虑尺寸精度、表面粗糙度和成本方面的因素以便选择适合的打印方式。

参考文献：

[1] 宋彬，崔聿辰，李雨. 3D 打印技术和铸造模拟技术在精密铸造生产中的应用 //2014 重庆市铸造年会论文集[C]. 重庆：机械工业学会，2014：408-413.

[2] 齐俊梅，姚雪丽，陈辉辉，等. 3D 打印聚合物材料的研究进展[J]. 热固性脂，2019，34(2)：60-63.

[3] 陈建华，杨彬，李冰，等. 熔模精密铸造模样质量控制[J]. 铸造技术，2012(3)：370-372.

[4] 屈银虎，李涤尘，邢建东. 基于 RP 的快速精密铸造工艺的研究[J]. 铸造技术，2006，27(12)：1286-1288.

[5] 宗学文，刘亚熊，魏罡. 光固化立体造型熔模铸造工艺的研究[J]. 西安交通大学学报，2007，41(1)：87-90.

[6] 杨劲松，沈其文，史玉生. SLS 模料特性及熔模铸造工艺研究[J]. 特种铸造及有色合金，2007，27(1)：53-56.

新书邮购

《消失模铸造工艺学》

《消失模铸造工艺学》由化学工业出版社2019年5月20日出版发行。（书号：ISBN978-7-122-34175-4）

《消失模铸造工艺学》作者刘立中，历经三十多年现场实践经验的总结和理论的升华。全书总结136个案例，选用1718帧彩色照片，撰写583千字创造性的提出了消失模铸造“三场理论”，详细解读在“流场、热场、负压场”理论指导下的“消失模铸造浇注系统设计原则”，提出了“借用型腔做浇道，极致简化浇注系统”新的理念，在国内外均属首创。奠定了消失模铸造的理论基础，提出了消失模铸造研究与发展的方向。

定价：498元

邮购咨询：李巧凤　　电话/传真：029-83222071　　微信：13991824906