

铸钢件 3D 打印砂型芯用水基涂料的开发与应用

李 玲, 尹绍奎, 谭 锐, 于瑞龙, 高天娇, 黄旦忠

(沈阳铸造研究所有限公司, 高端装备轻合金铸造技术国家重点实验室, 辽宁沈阳 110022)

摘要: 根据3D打印砂型芯的特点, 研究了悬浮剂及粘结剂对3D打印砂型芯用水基流涂涂料流变性的影响, 并优化最佳配比。试验了涂层烘干温度对砂型强度的影响, 确定最佳烘干温度。通过应用验证, 流涂涂层均匀光滑, 提高了铸件的表面光洁度。

关键词: 水基涂料; 3D打印砂型芯; 流变性; 铸钢件

随着科学与生产技术的不断革新与发展, 增材制造技术逐渐在制造业中占据越来越重要的地位, 成为一种不可或缺的快速成形制造方法。在先进的铸造生产工艺中, 铸型芯的3D打印技术是一种全新的数字化快速型芯的制造工艺。无需铸造模具, 仅使用精密成形设备和计算机软件控制, 就可实现增材成形, 可制造出复杂、精确的砂型芯, 尤其是铸造模具难以成形的复杂砂型芯, 可实现复杂砂型芯的一体成形, 大大提高了铸造毛坯的尺寸精度, 缩短了新产品的开发流程和生产周期, 同时也实现了传统铸造行业的数字化、信息化转型升级。

3D打印砂型芯多孔多腔、结构复杂, 而且在3D打印时制得的砂型芯的表面, 在打印角度较小的位置, 具有明显的阶梯式痕迹, 如图1所示。砂型芯表面上的阶梯式痕迹, 会导致铸件表面质量的恶化, 因此对涂料的流平性要求很高。使用常规涂料施涂时涂层表面的流痕较重, 堆积、滴挂现象十分严重, 砂型芯的修饰等后处理很麻烦, 严重影响砂型芯的表面质量以及铸件尺寸精度。因此, 根据对3D打印砂型芯所用涂料的要求, 开发适用于3D打印砂型芯用的水基流涂涂料, 对提高铸件的表面质量, 拓宽砂型芯3D打印技术在铸造生产中的推广应用具有较大的现实意义。

作者简介:

李玲(1975-), 女, 高级工程师, 研究方向为铸造辅助材料。E-mail: lilings357@163.com

中图分类号: TG221
文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2019)04-0359-05

基金项目:

国家科技重大专项项目(2017ZX04014001); 辽宁省科技计划项目(2017106043); 沈阳市科技计划项目(Y18-2-027); 机械科学研究总院技术发展基金项目。

收稿日期:

2018-11-08 收到初稿,
2019-01-03 收到修订稿。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

根据铸钢件浇注温度高的特点, 本研究选择锆英粉和白刚玉粉作铸钢件的耐火骨料; 试验选用PVA、硅溶胶作为涂料的粘结剂; 悬浮剂选用改性硅酸镁铝悬浮剂、锂基膨润土的合理复配; 润湿渗透剂选用KT-70; 消泡剂为DZ-200; 防腐剂为YN-; 溶剂为水。

1.2 试验方法

调整涂料悬浮剂、粘结剂的种类及加入量, 并调整涂料其他成分的加入量配制涂料, 测定涂料的流变性(触变率、屈服值); 将调好的涂料在准备好的3D打印砂型(芯)上进行流涂试验, 观察涂料的流平性能、涂层的覆盖性, 最后进行配方优化, 并进行浇注验证。

1.3 涂料的制备

涂料试验配方方案如表1所示。

2 试验结果及分析

3D打印砂型(芯)结构复杂且多孔多腔;砂粒之间的孔隙率大,导致型(芯)的致密性差;且砂型(芯)表面的阶梯式痕迹使得砂型(芯)表面的光洁度差。为适应3D打印砂型(芯)的特点,要求3D打印砂型(芯)水基流变涂料具有对砂型(芯)表面覆盖能力强、润湿铺展性能好、渗透适中,悬浮性好、流平性和防粘砂效果优异的特性。3D打印砂型(芯)用流变涂料与刷涂、喷涂等涂料施涂方法最大的不同是涂料在整个施涂过程中涂料始终要保持良好的流动性和流平性,以形成均匀光滑的涂层,达到较好的表面质量。

2.1 涂料成分对涂料流变性的影响及配方优化

表2是不同悬浮剂成分的涂料配方,图2为表2中涂料在相同条件下,1#、4#、5#涂料的流平效果。对于每种悬浮剂而言,在保证涂料适当的固含量前提下,锂基膨润土具有较好的悬浮性和流动性,但锂基膨润土的触变性较差,所以在流涂结束后的恢复阶段涂层流平性差;而改性的硅酸镁铝则具有较好的触变性和悬浮性,但由于涂料的触变性较大,因而涂料流动性差,因此不适合单独应用做流涂涂料的悬浮剂。锂基膨润土与改性硅酸镁铝的复合,随着锂基膨润土加入量提高,改性硅酸镁铝加入量降低,涂层厚度逐渐变薄。由图2可以看出,1#涂层较厚,明显堆积,流平差;5#涂层流淌严重,涂层较薄,遮盖差;4#涂层适中,涂料无堆积、流痕等,流平效果较好。经过系统的试验,确定用锂基膨润土和改性硅酸镁铝做涂料的复合悬浮剂,既能保证涂料具有较好的流动性,又能改善涂料的流平性能。

粘结剂的种类及加入量对涂料的性能及流涂效果具有较大的影响。考虑铸钢件用涂料要求具有较好的

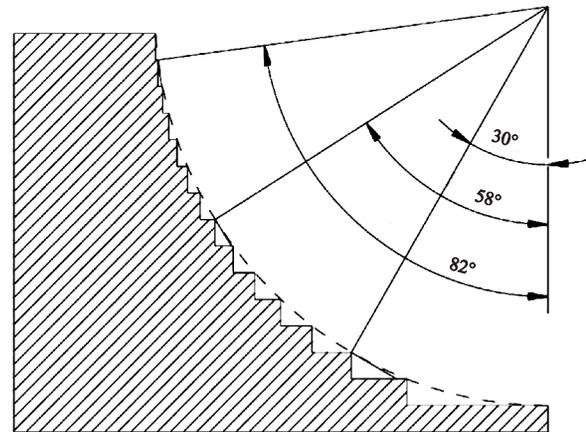


图1 3D打印砂型(芯)的垂直断面上阶梯式痕迹

Fig. 1 Ladder marks on the vertical section of the 3D sand mold (core)

高温强度,选用聚乙烯醇和硅溶胶做涂料的复合粘结剂。如表3所示,随着硅溶胶加入量的提高,涂料的粘度明显增加,使涂层变厚,表面流痕严重。相同条件下,表3中1#、2#、4#涂料的流平效果如图3所示。1#、2#涂层适中,涂料无堆积、流痕等,流平效果较好;4#涂层稍厚,流平差,有明显流痕。

因此确定聚乙烯醇和硅溶胶的加入比例为3:1,既不影响涂料的粘度变化,又能改善涂料的流变性能,同时使涂层又具有较好的高温强度。

通过系统实验,涂料的优化配方如表4所示。

流涂涂料在整个施涂过程中涂料始终要保持良好的流动性和流平性,以形成均匀光滑的涂层,因此需要涂料具有较低的触变率和屈服值。

涂料流变曲线终剪切曲线和恢复曲线所围成的面积 $S_{总}$ (即触变环),可用来表征涂料的触变性。通过

表1 3D打印水基涂料配方方案
Table 1 Formulation of 3D printing water-based coating

										$w_B / \%$
锆英粉	白刚玉粉	锂基膨润土	改性硅酸镁铝	PVA	硅溶胶	润湿渗透剂KT-70	消泡剂DZ-200	防腐剂YN-	溶剂水	
70	30	0~2.5	0~2.5	0~2	0~1	0.2~0.5	0.3~0.6	0.2~0.5	适量	

表2 不同悬浮剂成分的涂料配方
Table 2 The compositions mixture ratio of coatings with different suspending agents

											$w_B / \%$
序号	锆英粉	白刚玉粉	锂基膨润土	改性硅酸镁铝	PVA	硅溶胶	润湿渗透剂KT-70	消泡剂DZ-200	防腐剂YN-	溶剂水	
1	70	30	0	2.0	1	0.3	0.3	0.4	0.3	适量	
2	70	30	0.5	1.5	1	0.3	0.3	0.4	0.3	适量	
3	70	30	1.0	1.0	1	0.3	0.3	0.4	0.3	适量	
4	70	30	1.5	0.5	1	0.3	0.3	0.4	0.3	适量	
5	70	30	2.0	0	1	0.3	0.3	0.4	0.3	适量	

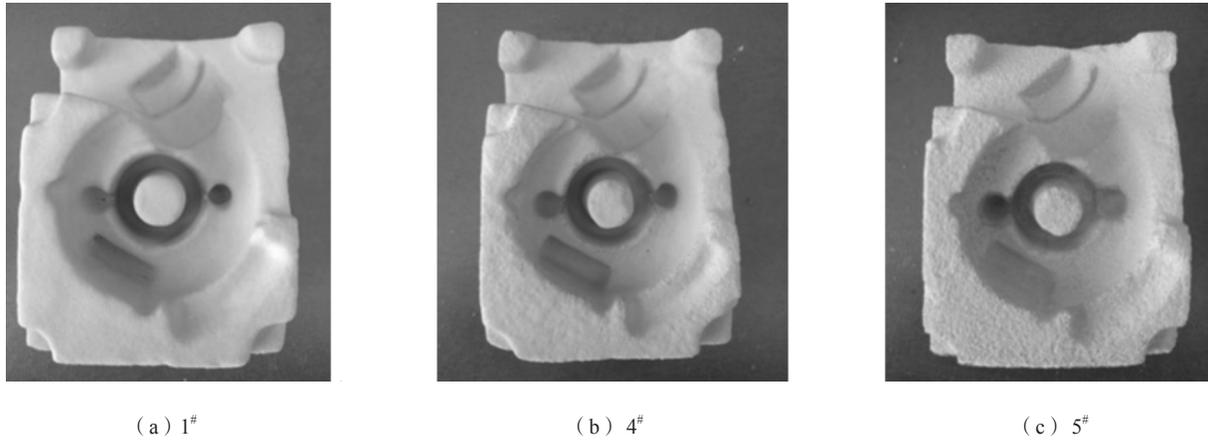


图2 1[#], 4[#], 5[#]涂料的流平效果
Fig. 2 Leveling effect of 1[#], 4[#], 5[#] coatings

表3 不同粘结剂成分的涂料配方
Table 3 The compositions mixture ratio of coatings with different binders

序号	锆英粉	白刚玉粉	锂基膨润土	改性硅酸镁铝	PVA	硅溶胶	润湿渗透剂KT-70	消泡剂DZ-200	防腐剂YN-	溶剂水	w_B /%
1	70	30	1.5	0.5	1.2	0	0.3	0.4	0.3	适量	
2	70	30	1.5	0.5	0.9	0.3	0.3	0.4	0.3	适量	
3	70	30	1.5	0.5	0.6	0.6	0.3	0.4	0.3	适量	
4	70	30	1.5	0.5	0.3	0.9	0.3	0.4	0.3	适量	
5	70	30	1.5	0.5	0	1.2	0.3	0.4	0.3	适量	

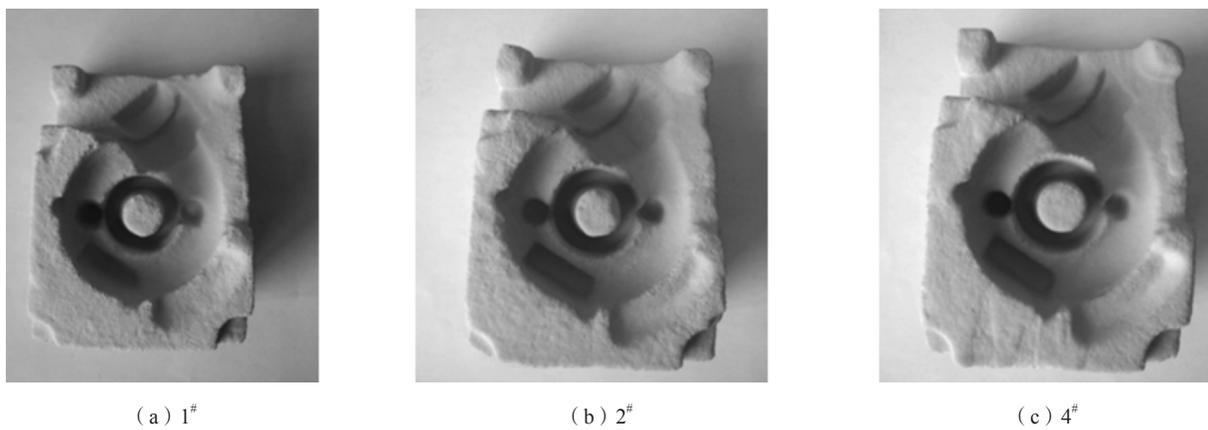


图3 1[#]、2[#]、4[#]涂料的流平效果
Fig. 3 Leveling effect of 1[#]、2[#]、4[#] coatings

表4 3D水基涂料的优化配方
Table 4 Formulation of optimized 3D water-based coating

锆英粉	白刚玉粉	锂基膨润土	改性硅酸镁铝	PVA	硅溶胶	润湿渗透剂KT-70	消泡剂DZ-200	防腐剂YN-	溶剂水	w_B /%
70	30	1.5	0.5	0.9	0.3	0.3	0.4	0.3	适量	

表5 涂料工艺性能指标范围
Table 5 Performance index range of 3D water-based coating process

粘度 ($\Phi 6$ 流杯)/s	密度 /($g \cdot cm^{-3}$)	波美度 $^{\circ}Be'$	悬浮性/%		触变率 /($Pa \cdot s^{-1}$)	屈服值 /Pa
			2 h	24 h		
7.5~8	1.85~1.90	65~70	100	≥ 98	10~15	5~10

计算触变环面积的大小,可以对涂料的触变性作出量化检测。从公式(1)可以看出,只要测得各个剪切速率下的表观黏度(包括稀释黏度和恢复黏度),就可以计算出涂料的触变率大小。该涂料的触变率为 $10.9 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

$$S_{\text{总}} = \pi^2 [0.08 (\eta_6 - \eta'_6) + 0.64 (\eta_{12} - \eta'_{12}) + 3.2 (\eta_{30} - \eta'_{30})] \quad (1)$$

式中: S 为触变率, η 为稀释黏度, η' 为恢复黏度。

涂料的屈服值在一定程度上反应出涂料抗重力流淌的性能。当施加在涂料上的剪切应力低于涂料的屈服值时,涂料不发生变形和流动;只有剪切应力值大于涂料的屈服值时,涂料才能流动。涂料的屈服值根据公式(2)计算:

$$\tau_N = 4\pi (\eta_6 - \eta'_6) / 9 \quad (2)$$

式中: τ 为剪切应力。

采用NDJ-5S数字旋转粘度计进行涂料流变性的测量。NDJ-5S数字旋转粘度计可以实时测量涂料的表观粘度,经过换算可以得到剪切速率与剪切应力,根据测量数据和计算结果可绘制涂料的流变曲线,涂料的流变曲线如图4所示。通过计算,涂料的触变率为 $13 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$,屈服值为 6 Pa 。

2.2 涂层烘干温度对砂型(芯)强度的影响

由于3D打印砂型芯砂粒的间隙较大,涂料中的水容易渗入到砂型(芯)中,而涂覆完涂料后,涂层更加致密,在干燥过程中砂型(芯)中的水分不容易

烘出,对砂型(芯)强度产生不良影响。3D打印砂型(芯)多为结构复杂,薄壁尖角部位较多,当烘干温度过高时,容易导致薄壁或尖角部位的砂型焦化。因此烘干工艺与普通的自硬砂型芯的烘干工艺有所不同,本研究通过试验确定了最佳的烘干温度。

试验采用3D打印的“8”字试块及抗弯试块,涂料的涂覆方式采用浸涂的施涂方法。将试样浸入制备好的涂料中,10~12 s后取出,涂层厚度约 0.3 mm ,自然流淌平整后备用。

试样烘干温度对试样强度影响如图5所示。从图5看出,试样涂层的烘干温度越高,试样的强度越低。建议起始烘干温度为 $105 \text{ }^\circ\text{C}$,最后将温度升高到 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 进行干燥,虽然 $180 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上烘干强度尚可使用,但尖角处的砂已被烧焦极易脱落,所以不建议使用。

3 生产浇注

本研究开发的涂料在铸钢件上进行了浇注试验。铸件重约 1.5 t ,铸件材质为ZG06Cr13Ni4Mo。3D打印砂芯直径约 1400 mm ,垂直高度约 550 mm ,内部有螺旋通孔。涂料调整后的技术参数指标如表6所示。

涂料的施涂方法采用流涂,涂层厚度约 0.5 mm 。砂芯的流涂效果如图6所示,涂层均匀光滑,无流挂、滴痕等现象。所浇铸件如图7所示,铸件表面光滑,无粘砂、气孔等铸造缺陷。

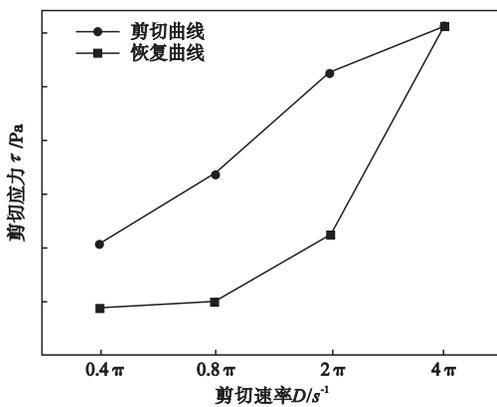


图4 涂料的流变曲线

Fig. 4 Rheological curves of coatings

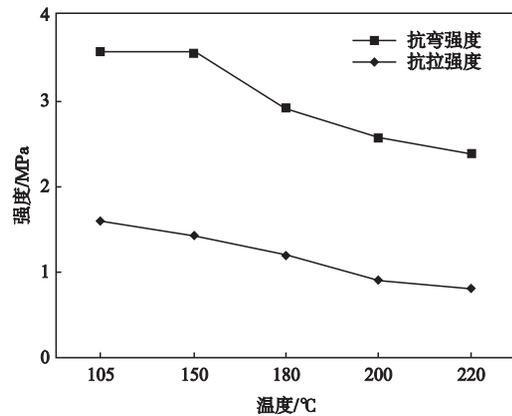


图5 试样烘干温度和强度的关系

Fig. 5 Relationships between drying temperature and strength of sand sample with coating

表6 调整后的涂料工艺性能指标

Table 6 Performance index of 3D water-based coating process after adjusted

粘度 /s ($\Phi 6$ 流杯)	密度 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	波美度 $^{\circ}\text{Be}'$	悬浮性/%		触变率 /($\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)	屈服值 /Pa
			2 h	24 h		
7.8	1.89	68	100	99.6	13	6

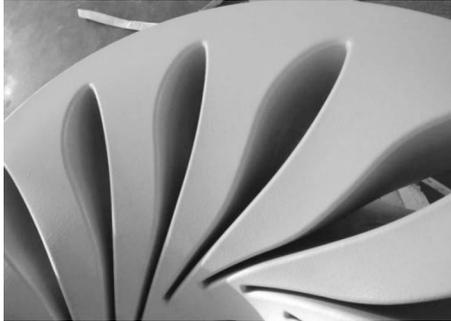


图6 流涂后的砂芯
Fig. 6 Sand core after flowing coating



图7 落砂后的铸件
Fig. 7 Casting after shakeout

4 结论

(1) 3D打印砂型(芯)用水基流涂涂料的性能特点是具有低屈服值、低触变性的假塑性流体,屈服值控制在 $5 \sim 10 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$,触变率控制在 $10 \sim 15 \text{ Pa}$ 。

(2) 建议3D打印砂型(芯)用流涂涂料的涂层起始烘干温度为 $105 \text{ }^\circ\text{C}$,最后将温度升高到 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 进行干燥。

(3) 铸钢件用3D打印砂型(芯)用流涂涂料的波美度控制为 $65 \sim 70 \text{ }^\circ\text{Be}'$,2 h悬浮性为100%。流涂涂料具有较好的表面质量及流平性,满足3D打印实际需求。

参考文献:

- [1] 岡根,利光. 3D打印技术在铸造工艺中的应用[J]. 国外机车车辆工艺, 2016(3): 18-22.
- [2] 李少海,李昭青. 3D打印在铸造技术中应用[J]. 铸造技术, 2018, 39(2): 384-389.
- [3] 于彦奇. 3D打印技术的最新发展及在铸造中的应用[J]. 铸造设备与工艺, 2014(2): 1-4.
- [4] 韩辉,魏兆连,徐福先. 铸造涂料流变模型及流变特性参数化评价研究[J]. 武汉汽车工业大学学报, 1996, 18(5): 36-40.
- [5] 徐峰. 流变剂的使用及其发展[J]. 现代涂料与涂装, 2000(5): 30-33.

Development and Application of Water-Based Coating for 3D Printing Sand Moulds and Cores for Steel Castings

LI Ling, YIN Shao-kui, TAN Rui, YU Rui-long, GAO Tian-jiao, HUANG Dan-zhong
(Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., State Key Laboratory of Light Alloy Foundry Technology for High-End Equipment, Shenyang 110022, Liaoning, China)

Abstract:

According to the characteristics of 3D printing sand mold (core), the effects of suspending agent and binder on the rheology of 3D printing sand mold (core) water-based coating were studied, and the optimal formulation was received. The influence of coating drying temperature on the strength of sand mold was tested, and the optimal drying temperature was determined. Practical applications of research results suggest that the coating is homogeneous and smooth, and the castings produced have good surface finish.

Key words:

water-based coating; 3D printing sand moulds and cores; rheology; steel castings