

铸铁用水基消失模铸造涂料研究

杨哲¹, 汪磊²

(1. 长江工程职业技术学院, 湖北武汉 430212; 2. 华中科技大学船舶与海洋工程学院, 湖北武汉 430074)

摘要: 针对消失模铸造生产中铸铁件的积碳、皱皮等缺陷问题, 研制了一种水基消失模铸造涂料。选用铝矾土作为主加耐火骨料, 高岭土、硅灰石、滑石粉为辅加耐火骨料, 海泡石和CMC为复合悬浮剂, 硅溶胶和聚乙烯醇(PVA)作为复合粘结剂。采用正交试验法和极差分析法, 找到了铝矾土、高岭土、硅灰石、滑石粉的最佳配比, 配制成的水基消失模铸造涂料各项性能良好。生产验证表明: 该配方涂料工艺性能良好, 铸件表面光滑, 无粘砂、气孔、积碳、皱皮等铸造缺陷。

关键词: 铝矾土; 铸铁; 消失模; 水基涂料

消失模铸造技术具有适用范围广、铸件尺寸形状精确、表面光洁、便于机械化生产、生产成本低、设计自由大、生产效率高、清洁生产、绿色铸造等优点^[1-3]。近年来, 随着相关科研院所对消失模铸造原理和理论研究的不断深入, 我国的消失模铸造产业发展势头迅猛^[4]。据不完全统计, 当前我国从事消失模技术研究的科研院所达到百余家之多^[5], 消失模铸造企业已经超过2 000家, 年产铸件在300万吨以上, 并且还在不断增加中。但是部分消失模铸造企业为了节省成本, 采用自配涂料, 由于不注重涂料配方的最佳配比, 涂料各项性能大大降低。采用消失模技术生产铸铁件时的积碳、皱皮等问题长期得不到有效解决, 导致铸铁件成品率不高、成本过高, 限制了我国消失模铸造业的快速发展, 其主要是由于消失模涂料用耐火骨料的选择不当以及涂料的高温透气性能较差导致。

因此本研究选择铝矾土作为主要耐火骨料, 高岭土、硅灰石、滑石粉为辅加耐火骨料, 并就高岭土、硅灰石、滑石粉三种耐火骨料对铸铁用水基消失模涂料性能的影响作了初步研究, 最终研制出一种成本较低、工艺性能良好的铸铁用水基消失模涂料。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

铝矾土: 主要矿物成分是莫来石, 其具有热膨胀系数小、耐火度高、化学稳定性好、价格低等优点, 粒度325目;

高岭土: 主要矿物组成为 SiO_2 和 Al_2O_3 , 具有良好的抗酸溶性和化学稳定性、烧结性、较低的阳离子交换量和较好的耐火性等优良的物理、化学特性, 耐火度1 700℃;

硅灰石^[6]: 一种含钙的偏硅酸盐矿物, 呈针状和细粒状, 色泽光亮, 熔点1 540℃, 粒度200目;

滑石粉: 主要成分为含水的硅酸镁。耐火度1 200~1 300℃。其具有润滑性、耐火性、抗酸性、绝缘性、熔点高、吸附力强等优良的物理、化学特性, 粒度325目;

海泡石(325目); CMC(200目);

硅溶胶: SiO_2 含量24%~30%, $\text{Na}_2\text{O} \leq 0.05\%$; 聚乙烯醇(PVA);

表面活性剂: 十二烷基苯磺酸钠; 消泡剂: 正辛醇; 助剂: Fe_2O_3 。

作者简介:

杨哲(1987-), 女, 讲师, 硕士, 主要研究方向为铸造涂料和新材料。E-mail: 424757635@qq.com

中图分类号: TG221

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)05-0496-05

基金项目:

国家自然科学基金青年科学基金项目(11502088)。

收稿日期:

2019-02-26 收到初稿,

2019-05-20 收到修订稿。

1.2 原料预处理及涂料制备方法

原料预处理：①为了涂料制备方便，粘结剂硅溶胶、聚乙烯醇（PVA）需要进行活化处理，首先将二者的水溶液在高速（1 200 r/min）下搅拌均匀，然后加入十二烷基苯磺酸钠进行活化，静置24 h备用；②CMC：首先将CMC与乙醇按照1：1的质量比进行分散，然后再按照CMC：水=1：50的质量比加入水，搅拌均匀后，静置24 h备用；③海泡石：将海泡石与水按照1：50的质量比高速（1 200 r/min）搅拌均匀，制得海泡石浆料，静置24 h备用。

涂料制备方法：首先将称量好的耐火骨料（铝矾土、高岭土、硅灰石、滑石粉）、 Fe_2O_3 粉料在碾轮式混砂机中搅拌均匀，然后缓慢加入经过活化处理的硅溶胶、聚乙烯醇（PVA）水溶液、CMC水溶液、海泡石浆料以及正辛醇消泡剂、适量水混碾2 h后，用胶体磨研磨2次后出磨待用。

1.3 涂料主要性能测试方法

（1）涂层强度。首先将涂料涂覆于玻璃板上，待涂层干燥后，将玻璃板倾斜与水平面成为 45° 角。在距离玻璃板1 000 mm处，用涂4粘度杯向玻璃板上落砂，直至擦破涂层露出玻璃板为止，用天平称出落砂总质量，作为判断涂层表面强度优劣的定量指标^[7]。

（2）发气量。首先将涂料在101-2型干燥箱中烘干、用陶瓷研钵研磨均匀，再用精密天平称取5个质量均为 $1\text{ g} \pm 0.01\text{ g}$ 的样品，依次在STZ-A型直读式发气性测定仪（邯郸市华宇仪器仪表有限责任公司生产）上进行发气量测定。去掉最高值和最低值后，取剩余三个检测数据的平均值，即为涂料的发气量。

（3）条件粘度。采用LND-1型涂4粘度杯进行测定。

（4）涂挂性。制备规格为 $120\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times$

30 mm 的EPS模样待用，首先称量出该模样的质量 M_1 ，然后在已调制好的涂料中浸涂三次，将其放入恒温干燥箱中（已设定温度为 40°C ）干燥2~4 h，待涂层完全干透后，称量出其总质量 M_2 ，两次的质量之差 M （ $M=M_2-M_1$ ）即为附着量，并且观察涂层表面流淌状况来判断涂挂性的好坏，涂层均匀且光滑、无裂纹，与模样无剥离现象为I级；有小于1 mm树枝状或网状细裂纹，涂层与模样无明显剥离现象为II级；有大于1 mm树枝状或网状细裂纹，或贯通性裂纹，涂层与模样之间有剥离现象为III级。

（5）剥离性。浇注后，涂层与铸件表面分离的能力，铸件浇注成形后，用肉眼观察铸件表面的涂层成片且自动剥离的为I级；铸件表面涂层需要敲打才能剥离的为II级；铸件表面涂层紧紧粘附在铸件上，不能剥离的为III级。

2 试验方案与结果

2.1 试验方案

在铸铁用水基消失模涂料的所有组分中，耐火骨料是其主体部分。最常用的耐火骨料是石英粉，其次是铝矾土、高岭土、滑石粉、石墨粉、刚玉粉、硅灰石等耐火骨料。采用单一耐火骨料时，涂料的耐火度尽管较高，但是悬浮性、烧结性、条件粘度等综合性能较差，因此实际生产中，经常采用两种及两种以上的耐火骨料混合使用，用以改善涂料的综合性能。

为了探讨不同耐火骨料对铸铁用水基消失模涂料性能的影响，本研究共选用了铝矾土、高岭土、硅灰石、滑石粉等四种不同类型的耐火骨料，其中铝矾土为主加耐火骨料，高岭土、硅灰石、滑石粉为辅加耐火骨料，其他各组分加入量如表1所示，采用 $L_9(3^4)$ 正交表安排试验，因素水平表如表2所示，正交试验方案如表3所示。

表1 涂料助剂加入量（占耐火骨料的质量分数）
Table 1 Coating additive amount (percentage by mass of refractory aggregate)

粘结剂		悬浮剂		活性剂	消泡剂	助剂	载液
硅溶胶	PVA	海泡石	CMC	十二烷基苯磺酸钠	正辛醇	Fe_2O_3	水
4	1	4	0.5	0.1	0.1	0.5	适量

2.2 试验结果

按照1.2中的涂料制备方法，将表3正交试验方案中的9种涂料研制成膏状，加适量水搅拌均匀，调涂料密度至 1.5 g/cm^3 ，然后分别测量涂料24 h悬浮率、条件粘度、发气量、涂层强度、涂挂性等性能指标，其试验结果如表4所示。

表2 $L_9(3^4)$ 因素水平表（占铝矾土的质量分数）

Table 2 $L_9(3^4)$ table of factor levels
(Percentage of mass of bauxite)

因素	A (高岭土)	B (硅灰石)	C (滑石粉)
水平1	20	10	10
水平2	30	20	15
水平3	40	30	20

3 试验结果分析

在消失模涂料的所有性能指标中, 涂料的涂挂性能最为重要, 通过对表4中的正交试验结果进行分析发现, 以上9种涂料的涂挂性能均在Ⅱ级及以上, 涂挂性能良好, 能满足消失模涂料实际生产需要, 为了进一步探究耐火骨料中各组分对涂料24 h悬浮率、条件粘度、发气量、涂层强度等性能的影响规律, 现对表4中的试验数据分别进行正交试验结果分析和极差分析, 结果如表5、表6所示。

由表6可知, 在以上三种辅加耐火骨料中, 影响涂料24 h悬浮率的最显著因素是高岭土, 其次是硅灰石, 最后是滑石粉, 其主要原因是高岭土类似于膨润土, 质软、易分散悬浮于水中, 能显著提高涂料条件粘度和悬浮性。影响涂层强度的最显著性因素是硅灰石, 对于涂层强度的影响因素顺序为: 硅灰石 > 高岭土 > 滑石粉。

影响涂料发气量的最显著因素是滑石粉, 其次是高岭土, 对于涂料发气量的影响因素顺序为: 滑石粉 > 高岭土 > 硅灰石, 主要原因是滑石粉(层状结构的硅酸镁水合物)、高岭土(层状的含结晶水的硅酸盐)的分子结构中均含有结晶水, 浇注时二者分别在800~900℃、600~900℃的温度范围内快速失去结晶水, 产生大量水蒸气, 从而使得涂层发气性上升。

影响涂料条件粘度的最显著因素是高岭土, 对于涂料条件粘度的影响因素顺序为: 高岭土 > 滑石粉 > 硅灰石, 主要原因是高岭土是一种以高岭石族粘土矿物为主的粘土和粘土岩, 具有良好的可塑性, 用于水基涂料时形成絮状胶体水溶液, 从而使得涂料条件粘度增高。

为了找到三种辅加耐火骨料的最佳水平, 现采用单因素分析方法对涂料的各性能指标进行分析。

在涂料实际使用过程中, 为了防止涂料的快速沉淀以及涂料施涂时的方便性, 通常要求涂料有较高的悬浮率和较低的条件粘度, 因此悬浮率应取最大的水平, 即 $A_3B_3C_1$; 而条件粘度取最小的水平即 $A_1B_3C_1$ 。另外为了防止涂层发气性过大加剧铸件的气孔和炭黑缺陷, 防止涂层强度不够导致的毛刺、冲砂、模样变形、模样破损等缺陷, 涂料发气性应取最小的水平, 即 $A_2B_1C_1$; 而涂层强度取最大的水平, 即 $A_3B_2C_3$ 。

在涂料的24 h悬浮率、条件粘度、发气量、涂层强度、涂挂性等性能指标中, 在24 h悬浮率和涂挂性两项性能满足涂料使用要求的前提下, 首先应该要满足的是涂层强度指标, 其次是涂层的发气量指标、条件粘度指标, 结合各性能之间的主次关系, 其最优组合为: $A_3B_2C_1$, 即涂料最佳配方, 如表7所示, 现按照表7中的配方将涂料配制好, 并对其性能进行测定, 详细数据如表8所示。

表3 正交试验方案
Table 3 Orthogonal experimental scheme

序号	方案	高岭土	硅灰石	滑石粉
1	$A_1B_1C_1$	20	10	10
2	$A_1B_2C_2$	30	20	15
3	$A_1B_3C_3$	40	30	20
4	$A_2B_1C_2$	20	10	10
5	$A_2B_2C_3$	30	20	15
6	$A_2B_3C_1$	40	30	20
7	$A_3B_1C_3$	20	10	10
8	$A_3B_2C_1$	30	20	15
9	$A_3B_3C_2$	40	30	20

表4 正交试验结果
Table 4 Orthogonal experimental results

样品号	方案	24 h 悬浮率/%	条件 粘度/s	发气量/ ($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)	涂层 强度/g	涂挂性
1	$A_1B_1C_1$	90	6.63	21.2	145	I
2	$A_1B_2C_2$	91	9.14	27.7	298	I
3	$A_1B_3C_3$	95	7.24	33.5	281	II
4	$A_2B_1C_2$	90	11.06	19.9	313	I
5	$A_2B_2C_3$	94	13.32	29.5	344	II
6	$A_2B_3C_1$	97	10.11	21.7	236	I
7	$A_3B_1C_3$	95	16.28	32.9	278	II
8	$A_3B_2C_1$	99	12.77	24.5	364	I
9	$A_3B_3C_2$	99	10.65	31.7	290	II

表5 正交试验结果分析
Table 5 Analysis of orthogonal experimental results

因素	A (高岭土)	B (硅灰石)	C (滑石粉)	
24 h悬浮率/%	k_1	92	91.7	95.3
	k_2	93.7	94.7	93.3
	k_3	97.7	97	94.7
条件粘度/s	k_1	7.67	11.32	9.84
	k_2	11.50	11.74	10.28
	k_3	13.23	9.33	12.28
发气量/ ($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)	k_1	27.5	24.7	22.5
	k_2	23.7	27.2	26.4
	k_3	29.7	28.9	31.9
涂层强度/g	k_1	241.3	245.3	248.3
	k_2	297.7	335.3	300.3
	k_3	310.7	269.0	301.0

表6 极差分析
Table 6 Range analysis

极差	24 h悬浮率	条件粘度	发气量	涂层强度
RA	5.7	5.56	6.0	69.4
RB	4.3	2.41	4.2	90.0
RC	2.0	2.44	9.4	52.7

4 生产验证

为了验证该配方涂料的性能优劣,进行现场浇注试验,按照表7中的配方将涂料配制好后,采用浸涂方式涂覆涂料,并反复浸涂、干燥三次。涂敷涂料后的模样、干燥后的模样如图1所示,由图可以看出,涂覆涂料后的模样表面涂层光滑、均匀,涂挂性良好。待在恒温干燥箱中将其完全干透后,在真空负压下进行浇注试验。

成形铸件及浇注后涂层的剥离情况如图2所示,结果发现:成形铸件表面光滑,没有出现粘砂、气

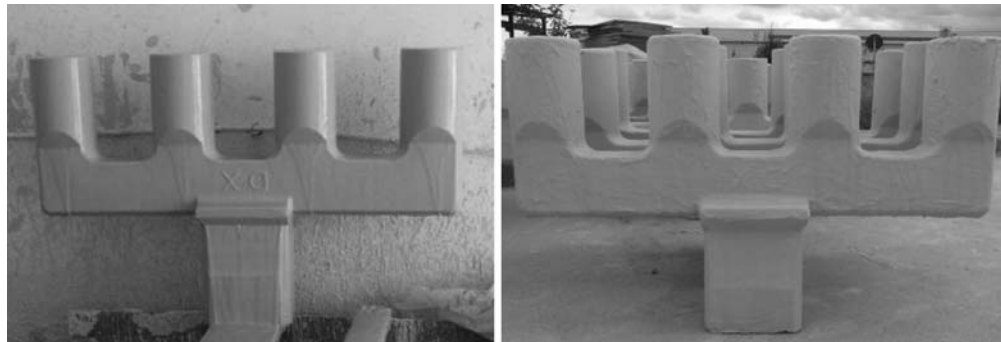
孔、积碳、皱皮等铸造缺陷。铸件清理时,铸件表面涂层大部分均能自由溃散,只有少部分热结部位涂层需要用锤子轻轻敲打,才能整块剥落,涂层整体溃散性良好。这主要是因为铸铁件消失模铸造的浇注温度较高,其浇注温度较其他铸造方法要高40~80℃,一般在1 400~1 500℃,不同耐火度的骨料搭配使用时,涂层的烧结不仅更加容易,而且涂层的强度也更高,浇注时,涂层中的有机粘结剂在高温金属液的热作用下被迅速烧蚀,产生大量孔洞,形成一种疏松的层片状结构,涂层的高温透气性良好,由于其泡

表7 铸铁用水基消失模涂料配方
Table 7 Cast iron water-base lost foam coating formula

耐火骨料										粘结剂		悬浮剂		活性剂	消泡剂	助剂	$w_B / \%$
铝矾土	高岭土	硅灰石	滑石粉	硅溶胶	PVA	海泡石	CMC	十二烷基苯磺酸钠	正辛醇	Fe ₂ O ₃	水	载液					
100	40	20	10	4	1	4	0.5	0.1	0.1	0.5	适量						

表8 铸铁用水基消失模涂料性能
Table 8 Water-based lost foam coating performance of cast iron

密度/(g·cm ⁻³)	24 h悬浮率/%	条件粘度/s	发气量/(mL·g ⁻¹)	涂层强度/g	涂挂性
1.5	93	9.65	21.2	145	I

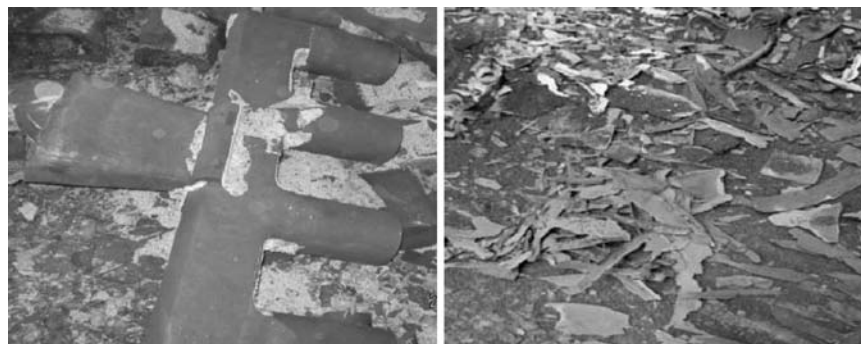


(a) 涂覆涂料后模样

(b) 涂料烘干后泡沫模样

图1 浇注模样

Fig. 1 Casting pattern



(a) 清砂后的铸件

(b) 涂层碎片

图2 铸件的落砂及清理

Fig. 2 Casting shakeout and cleaning

沫模样的裂解产物主要以气态产物为主，液态产物较少，在真空负压下浇注时，其气态、液态产物被迅速抽成型腔，使得高温金属液的充填更加容易，因此没有出现粘砂、气孔、积碳、皱皮等铸造缺陷，能够很好地满足实际生产需要，性能优良。

5 结论

(1) 在该配方涂料中，影响涂料24 h悬浮率和条件粘度的最显著因素是高岭土；影响涂层强度的最显著因素是硅灰石，影响涂层发气量的最显著因素是滑石粉，主要原因是滑石粉是一种层状结构的硅酸镁水合物，其分子结构中含有结晶水，浇注时在600~900 °C的温度范围内失去结晶水，产生大量水蒸气，从而使得涂层发气性上升。

(2) 该铸铁用水基消失模铸造涂料最优配方为：铝矾土100、高岭土40、硅灰石20、滑石粉10、硅溶胶4、PVA 1、海泡石4、CMC0.5、十二烷基苯磺酸钠0.1、正辛醇0.1、Fe₂O₃ 0.5、水适量。

(3) 经过生产试验验证发现，所制备的铸铁用水基消失模涂料涂挂性能良好，成形铸件表面光滑，没有出现粘砂、气孔、积碳、皱皮等铸造缺陷。铸件清理时，铸件表面涂层大部分均能自由溃散，只有少部分热节部位涂层需要用锤子轻轻敲打，才能整块剥落，涂层整体溃散性良好。能够满足实际生产需要，性能优良。

参考文献:

- [1] 宋会宗, 黄乃瑜, 周静一. 铸造涂料技术的发展趋势 [J]. 铸造技术, 2000 (5): 28-32.
- [2] 张少博, 李增民, 李立新. 机械振动在消失模铸造中的应用现状及发展 [J]. 铸造工艺与设备, 2013 (6): 28-30.
- [3] 车少波, 袁子洲, 潘强, 等. 消失模涂料防渗参与自剥离机理的研究 [J]. 铸造, 2012, 50 (11): 562-570.
- [4] 樊自田, 蒋文明. 消失模铸造技术现状及发展趋势 [J]. 铸造, 2012 (6): 583-591.
- [5] 田文华. 消失模铸造——铸造百花园中的一朵欲放的奇葩 [C]// 中国铸造行业系列会议 (318次) 2014中国第二十届消失模V法实型铸造技术年会论文集. 安徽, 2014: 34-37.
- [6] 高洪涛, 周杰, 刘兰俊. 纤维状硅灰石对消失模涂料性能的影响 [J]. 铸造, 2001 (12): 737-739.
- [7] 王桂红, 杨屹, 冯可芹, 等. 凸轮轴消失模铸造涂料的研制 [J]. 热加工工艺, 2008, 37 (3): 22-24.

Study on Water-Base Lost Foam Casting Coating for Cast Iron

YANG Zhe¹, WANG Lei²

(1. Yangtze River Engineering Vocational and Technical College, Wuhan 430212, Hubei, China; 2. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract:

A kind of water-base lost foam casting coating was developed to solve the problems of carbon deposition and elephant skin in cast iron parts in production in the production. Bauxite is selected as the main refractory aggregate, kaolin, wollastonite, talcum powder as the auxiliary refractory aggregate, sepiolite and CMC as composite suspension agent, silica sol and polyvinyl alcohol (PVA) as composite binder. The best ratio of bauxite, kaolin, wollastonite and talcum powder was found by orthogonal test and range analysis. The water-base EPC coating with good properties was prepared. The production verification shows that the coating has good technical performance, smooth casting surface and no casting defects such as burning-on, blowhole, carbon deposition and elephant skin.

Key words:

alumina bauxite; cast iron; lost foam; water-base coating