

一种铸铁用水基消失模涂料的制备及其性能研究

王天宝¹, 袁博², 黄建波³

(1. 内蒙古交通职业技术学院, 内蒙古赤峰 024005; 2. 武汉城市职业学院, 湖北武汉 430064;
3. 湖北工程职业学院, 湖北黄石 435003)

摘要: 选用亚铝晶石粉、滑石粉、高岭土、冰晶石粉作为复合耐火骨料, 以快干硅溶胶和聚乙烯醇(PVA)作为复合粘结剂, 木质素磺酸钠和凹凸棒土作为复合悬浮剂, 采用正交试验法和极差分析法确定了铸铁用水基消失模涂料中各组分的最优配比。通过对涂料各项性能进行测试、以及采用扫描电子显微镜对涂层的微观形貌和组织特征分析发现, 涂料综合性能良好。

关键词: 亚铝晶石粉; 滑石粉; 高岭土; 冰晶石粉; 消失模涂料

作者简介:

王天宝(1981-), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为铸造工艺, 铸造新材料。E-mail: 3012191@qq.com

中图分类号: TG221

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)10-1271-05

基金项目:

武汉黄鹤英才(优秀青年人才)资助、武汉市属高校产学研研究项目(CXY202020); 2020年度武汉市前资助科技计划项目(2020010601012292); 湖北省教育厅科研计划项目(B2021529、B2020427、B2019433); 武汉城市职业学院科研创新团队建设计划资助项目(2020whcvcTD02)。

收稿日期:

2022-03-07 收到初稿,

2022-04-21 收到修订稿。

消失模铸造又称作实型铸造, 相比传统砂型铸造法, 消失模铸造具有应用范围广、生产效率高、铸件精度高、生产成本低、绿色环保等突出优点, 被誉为“21世纪的铸造技术”和“铸造工业的绿色革命”^[1-2]。要想获得优质铸件, 涂料是关键, 国外有“涂料即是铸型”之说^[3]。

据相关文献资料^[4]介绍, 我国从20世纪60年代中期开始对消失模铸造进行研究和生产试验的尝试, 经过近60年的发展, 我国消失模铸造得到了长足的发展, 截止2021年, 我国消失模铸造企业已经超过700余家, 年产量在102万吨以上, 但总体上来看, 我国的消失模铸造技术还处于较低的水平, 消失模铸造涂料的商品化程度有待进一步提高。部分消失模铸造企业采用进口涂料或自配涂料来满足生产需要, 导致碳缺陷、夹渣、粘砂、气孔、表面皱皮、组织疏松等铸造缺陷问题, 导致生产成本较高, 因此, 为获得优质消失模铸件, 有必要根据我国国内资源情况出发, 从涂料的耐火骨料、粘结剂、悬浮剂和性能入手, 研制一种适合我国国情的、质优价廉、绿色环保的铸铁用水基消失模涂料。

1 试验原材料与预处理

1.1 试验原材料

(1) 耐火骨料。本试验采用亚铝晶石粉和滑石粉作为主加耐火骨料; 高岭土、冰晶石粉为辅加耐火骨料。

(2) 粘结剂。选用快干硅溶胶和聚乙烯醇(PVA)作为复合粘结剂。

(3) 悬浮剂。选用木质素磺酸钠(木钠)和凹凸棒土作为复合悬浮剂。

(4) 载体。水基涂料中, 水具有来源广、易获取、低成本、绿色环保的特性, 因此本试验选用自来水作为载液。

(5) 其他组分。选用琥珀酸新脂磺酸钠盐(T-80)作为表面活性剂; 正丁醇为消泡剂; 氧化铁(Fe_2O_3)作为氧化添加剂。

1.2 原材料预处理

凹凸棒土预处理: 将凹凸棒土与水按照1:10质量比加入MYP19150型电动搅拌机中, 在800 r/min的速度下快速搅拌成浆料, 静置24 h待用; 将聚乙烯醇(PVA)与

水按1:20的质量比加入到烧杯中,然后进行水浴加热(温度60℃),最终配制成5%浓度的PVA水溶液。

2 涂料性能的测试方法

密度,采用量筒、天平配合称量法测定^[5]。悬浮性,采用具塞量筒沉淀法测定。涂料粘度,采用涂4粘度计测定。涂刷性,采用NDJ-3型旋转式粘度计测定涂料的涂刷指数,首先分别测定出旋转粘度计在10 r/min、100 r/min下所对应的表观粘度值 η_{10} 、 η_{100} ,然后按照公式(1)计算涂料的涂刷指数 M ,用涂刷指数 M 值表示涂料的涂刷性的好坏, M 值越大,涂料的涂刷性越好,反之,涂料的涂刷性越差。

$$M = \eta_{10} / \eta_{100} \quad (1)$$

发气量,首先将涂料置于电热鼓风干燥箱中烘干并研磨均匀,然后称取质量为 $1 \text{ g} \pm 0.01 \text{ g}$ 的样品5个,依次在GET-III型智能造型材料发气性测定仪(北京同德创业科技有限公司生产)上进行发气量测定,测量5个数值,去掉最高值和最低值后,剩余3个检测数据的平均值即为涂料的发气量。

涂层强度,首先将涂料涂覆于玻璃板上,待涂层干燥后,用粘度杯向玻璃板上落砂,直至擦破涂层露出玻璃板为止,最后称出落砂总质量,作为判断涂层表面强度的定量指标^[6]。

涂挂性,首先将EPS泡沫制备成规格为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的模样,称量出其初始质量 m_1 ,然后在已调配好的涂料中反复浸渍两次后称量出其质量 m_2 ,两者质量之差即为涂料附着量 $M(M = m_2 - m_1)$,同时观察试样表面涂层塌落现象,可以得出涂料涂挂性是否良好,涂挂性分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ 3个等级,依次是优、良、差的级别^[7]。

高温抗裂性,首先制备好厚度为2 mm左右的涂层试样,待涂层试样完全干透后,再将其放入已加热至 $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ 的高温烧结炉中,保温5 min,然后打开炉门,观察高温下涂层表面是否产生裂纹以及裂纹的大小。涂层表面光滑无裂纹或只有极细的裂纹的为Ⅰ级;表面有树枝状或网状裂纹,裂纹宽度小于0.5 mm的为Ⅱ级;表面有树枝状或网状裂纹,裂纹宽度介于

0.5~1 mm之间的为Ⅲ级;表面有树枝状或网状裂纹,裂纹宽度大于1 mm的为Ⅳ级。

3 试验结果与分析

3.1 耐火骨料配比的选择

在涂料系统中,耐火骨料是消失模涂料的主要组成成分,不同的耐火骨料,其化学成分、涂料性能也各不相同,因单一骨料的涂料悬浮性、烧结性较差,在生产过程中一般采用两种或两种以上的耐火骨料搭配使用,用于改善涂料的综合性能。

据相关文献资料介绍^[8-10],亚铝晶石粉是一种中性、高惰性、浅白色的耐火骨料,其主要成分为:57%~60% Al_2O_3 、33.5%~36.5% SiO_2 、3.5%~6.5% ZrO_2 ,具有较好的热稳定性,与高温金属液不润湿,较好的抗粘砂和涂层易剥离等性能,价格低廉;滑石粉可以控制铸件的凝固速度,并提高金属液的流动性;高岭土具有白度高、质软、易分散、良好的可塑性和高的粘结性,良好的抗酸溶性和化学稳定性,易烧结,能显著提高涂层强度;在涂料中加入少量冰晶石粉能对EPS模样热分解出的碳产生吸附作用,使之不沉淀在铸件表面,从而消除皱皮等缺陷;因此本试验选用亚铝晶石粉、滑石粉,以及高岭土、冰晶石粉分别作为涂料的主加和辅加耐火骨料,为了确定主加和辅加耐火骨料各组分之间的最佳配比,本次试验共安排了3组预试验,涂料配比及涂料性能测试结果分别如表1、表2所示。

从表2可以看出,在其他组分相同的情况下,耐火骨料配比不同,涂料性能也各不相同。第1组涂料的涂层强度最高,涂挂性能最优;第3组涂料的悬浮率最高,发气量最小,涂刷性及高温抗裂性最优,主要是因为滑石粉是一种具有层状结构的硅酸镁水合物,在 $800\sim 900 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度下失去结晶水,其密度大于亚铝晶石粉。亚铝晶石粉可显著改善涂料的涂刷性,随着滑石粉加入量的减少,亚铝晶石粉的加入量增加,涂料整体密度呈不断下降趋势,24 h悬浮性显著提高,发气量逐渐减小,涂刷性改善明显。综合对比分析发现,第3组涂料在24 h悬浮率、涂刷性、发气量、高温抗裂

表1 耐火骨料确定试验成分配比
Table 1 Distribution ratio of the test determination of refractory aggregate

编号	主加耐火骨料		辅加耐火骨料		悬浮剂		粘结剂		表面活性剂T-80	消泡剂正丁醇	氧化剂 Fe_2O_3
	亚铝晶石粉	滑石粉	高岭土	冰晶石粉	木钠	凹凸棒土	硅溶胶	PVA			
1	30	50	15	5	4	2	5	1	适量	适量	适量
2	40	40	15	5	4	2	5	1	适量	适量	适量
3	50	30	15	5	4	2	5	1	适量	适量	适量

注:主加、辅加耐火骨料的总量为100%,其他各组分加入量均为占耐火骨料总质量的百分比。

表2 铸铁用水基消失模涂料主要性能测定值
Table 2 Main performance measurements of cast iron water-based lost foam coatings

编号	耐火骨料	密度/(g·cm ⁻³)	24 h悬浮率/%	涂刷性	发气量	涂层强度/g	涂挂性	高温抗裂性
1	30%的亚铝晶石粉+50%的滑石粉 +15%高岭土+5%冰晶石粉	1.72	93	6.3	137	712.6	I	III
2	40%的亚铝晶石粉+40%的滑石粉 +15%高岭土+5%冰晶石粉	1.58	95	7.4	105	656.2	II	II
3	50%的亚铝晶石粉+30%的滑石粉 +15%高岭土+5%冰晶石粉	1.46	97	8.1	79	583.4	II	I

性指标上均能满足铸铁用水基消失模涂料要求,但是在涂层强度、涂挂性指标上还存在进一步优化空间,因此本试验选用亚铝晶石粉50%、滑石粉30%、高岭土15%、冰晶石粉5%的3组耐火骨料配比。

3.2 涂料制备工艺

涂料采用球磨机制备,其制备工艺为:按照涂料配比将耐火骨料各组分称量好,置于球磨机中快速球磨0.5~1 h,依次加入快干硅溶胶、聚乙烯醇(PVA)水溶液、木质素磺酸钠、凹凸棒土浆料、T-80、正丁醇、Fe₂O₃、以及适量的水球磨4~6 h,然后用胶体磨研磨1~2 h,制成成品涂料,使用时将涂料波美度调至65~70(其密度:1.5~1.7 g/cm³),静置24 h待用。

3.3 最佳配方的确定

通过对表2中3组涂料的主要性能指标进行综合分析,确定了耐火骨料的最佳配比,为了进一步探讨涂料中复合粘结剂、复合悬浮剂各组分的最优加入量,现采用四因素三水平L₉(3⁴)正交实验法,以涂刷性、发气量、涂层强度、涂挂性、高温抗裂性五个指标对涂料性能优劣进行综合评价,其因素水平如表3所示,正交实验方案及结果如表4所示。

现将涂料性能评价指标涂挂性的3个等级I、II、III依次赋值1、2、3,高温抗裂性的4个等级I、II、III、IV依次赋值1、2、3、4,采用单因素分析法以及正交设计的直观分析方法分别计算出各因素在不同水平下的均值 k 和极差值 R ,结果如表5所示。

由表5可以看出,各因素在同一性能指标下的极差值各不相同,其中影响涂料涂刷性的最显著性因素是

表3 因素水平表L₉(3⁴)
Table 3 Factor level Table L₉(3⁴)

因素	快干硅溶胶 (A)	PVA (B)	木质素磺酸钠 (C)	凹凸棒土 (D)	w _B /%
水平1	4	2	4	1	
水平2	5	2.5	5	2	
水平3	6	3	6	3	

表4 正交实验方案及结果
Table 4 Orthogonal experiment scheme and results

试验方案	涂刷性	发气量 (mL·g ⁻¹)	涂层 强度/g	涂挂性	高温 抗裂性
A ₁ B ₁ C ₁ D ₁	6.4	17.8	612	I	I
A ₁ B ₂ C ₂ D ₂	7.9	27.3	718	I	I
A ₁ B ₃ C ₃ D ₃	9.7	22.4	665	II	I
A ₂ B ₁ C ₂ D ₃	9.1	24.4	768	II	I
A ₂ B ₂ C ₃ D ₁	8.5	33.5	849	I	II
A ₂ B ₃ C ₁ D ₂	12.1	21.2	833	III	III
A ₃ B ₁ C ₃ D ₂	11.5	19.6	947	I	III
A ₃ B ₂ C ₂ D ₃	8.6	35.3	703	II	II
A ₃ B ₃ C ₂ D ₁	7.8	30.5	651	II	II

表5 正交实验结果分析
Table 5 Analysis of orthogonal experiment results

指标	A(快干 硅溶胶)	B (PVA)	C(木质素 磺酸钠)	D(凹凸 棒土)	
涂刷性	k ₁	8.00	9.00	9.03	7.57
	k ₂	9.90	8.33	8.27	10.50
	k ₃	9.30	9.87	9.90	9.13
	R	1.90	1.53	1.63	2.93
发气量(mL·g ⁻¹)	k ₁	22.50	20.60	27.40	27.27
	k ₂	26.37	32.03	27.40	22.70
	k ₃	28.47	24.70	25.17	27.37
	R	5.97	11.43	2.23	4.67
涂层强度/g	k ₁	665.00	775.67	712.33	704.00
	k ₂	816.67	756.67	712.33	832.67
	k ₃	767.00	716.33	820.33	712.00
	R	151.67	59.33	108.00	128.67
涂挂性	k ₁	1.33	1.33	1.67	1.33
	k ₂	2.00	1.33	1.67	1.67
	k ₃	1.67	2.33	1.33	2.00
	R	0.67	1.00	0.33	0.67
高温抗裂性	k ₁	1.00	1.67	1.33	1.67
	k ₂	2.00	1.67	1.33	2.33
	k ₃	2.33	2.00	2.00	1.33
	R	1.33	0.33	0.67	1.00

凹凸棒土,对涂刷性而言较优方案是 $A_2B_3C_3D_2$;影响涂料发气量的最显著性因素是PVA,对发气量而言较优方案是 $A_1B_1C_3D_2$;影响涂层强度的最显著性因素是快干硅溶胶,对涂层强度而言较优方案是 $A_2B_1C_3D_2$;影响涂料涂挂性的最显著性因素是木质素磺酸钠,对涂挂性而言较优方案是 $A_2B_3C_2D_3$;影响涂料高温抗裂性的最显著性因素是快干硅溶胶,对高温抗裂性而言较优方案是 $A_1B_1C_1D_3$ 。

在涂料的各性能指标中,其主次关系依次为涂层强度>发气量>高温抗裂性>涂挂性>涂刷性,综合考虑,最终确定了粘结剂,悬浮剂的最佳配比为 $A_2B_1C_3D_2$,即快干硅溶胶5%、PVA 2%、木质素磺酸钠6%、凹凸棒土2%,涂料各组分分配比如表6所示,按照该涂料配比将其配制成成品涂料,同时选取当前市场

应用较广的XYSS-110型铸铁用消失模涂料(郑州翔宇铸造材料有限公司生产),统一调涂料波美度至70,分别对以上两种涂料性能进行测定,其性能测试结果如表7所示。

由表7可以看出,本配方涂料密度、涂层强度低于商品涂料;在24 h悬浮率参数上相差较小,均能较好地满足消失模涂料使用要求;在涂刷性、发气量参数上优于商品涂料;在涂料涂挂性以及高温抗裂性参数上二者相同,均为I级;经测算,本配方涂料综合成本为2 570元/吨,相比此商品涂料每吨可以节约成本730元,节约成本率22.1%,可以起到明显的降本增效作用,质优、价廉、综合性能优良,具有一定的市场应用前景。

表6 铸铁用水基消失模涂料配方
Table 6 Formulation of water-based lost foam coating for cast iron

耐火骨料/%				粘结剂/%		悬浮剂/%		表面活性	消泡剂	氧化剂	载体
亚铝晶石粉	滑石粉	高岭土	冰晶石粉	快干硅溶胶	PVA	木质素磺酸钠	凹凸棒土	T-80	正丁醇	Fe_2O_3	水
50	30	15	5	5	2	6	2	适量	适量	适量	适量

注:耐火骨料的总量为100%,其他各组分加入量均为占耐火骨料总质量的百分比。

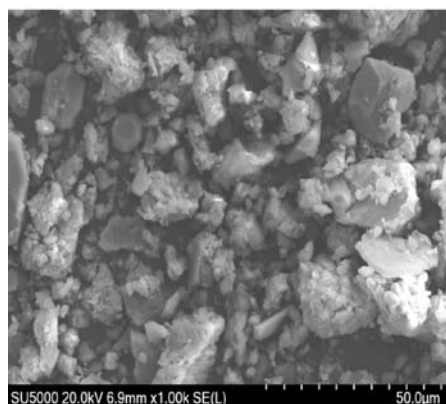
表7 铸铁用消失模涂料性能测定值
Table 7 Determination of properties of lost foam coatings for cast iron

编号	密度/($g \cdot cm^{-3}$)	24 h悬浮率/%	涂刷性	发气量/($mL \cdot g^{-1}$)	涂层强度	涂挂性	高温抗裂性	价格(元/吨)
1	1.55	97	10.2	20.1	875	I	I	2 570
XYSS-110	1.80	98	15.7	24.5	1 053	I	I	3 300

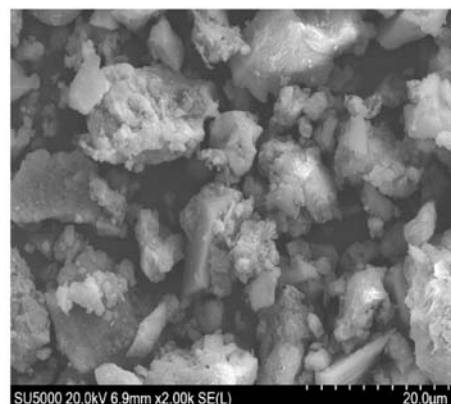
4 涂层形貌表征分析

依照表6中的涂料配方将涂料配制好,并制备好涂层试样(尺寸规格为100 mm×50 mm×20 mm),采用扫描电子显微镜对涂层的微观形貌进行观察,如图1所示,图1a、1b分别为1 000倍、2 000倍放大倍数下

涂层的微观形貌图,现对其进行对比性分析,从图1a中可以看到,涂层表面平整,各组分均匀分布,结合较为紧密、无聚集现象,其中亮色部分为涂层粉料颗粒,暗黑色部分为凹窝状结构,为了探究这些凹窝状结构,现将凹窝周围局部放大至2 000倍进行观察,如



(a)



(b)

图1 涂层在扫描电镜下的微观形貌

Fig.1 Microstructure of the coating under scanning electron microscope

图1b所示,从图1b中可以看出涂层表面凹窝状结构主要为涂层粉料颗粒间形成的孔洞,这些孔洞分布大体均匀,为浇注时产生的液态、气态产物顺利排出提供了通道,有效改善了涂层的高温透气性能,保证了浇注时金属液的充型稳定,防止了铸件表面气孔、碳缺陷的产生。

5 结论

(1) 采用极差分析法发现,影响涂料涂刷性、发气量、涂层强度、涂挂性、高温抗裂性的最显著性因素分别为凹凸棒土、PVA、快干硅溶胶、木质素磺酸钠和快干硅溶胶。

(2) 铸铁用水基消失模涂料最优配比为亚铝晶石粉50%、滑石粉30%、高岭土15%、冰晶石粉5%,粘结剂、悬浮剂的最优加入量分别为快干硅溶胶5%、PVA 2%、木质素磺酸钠6%、凹凸棒土2%。

(3) 通过扫描电子显微镜对涂层的微观形貌和组织特征进行分析发现,涂层表面平整,各组分均匀分布,结合较为紧密,无聚集现象,涂层粉料颗粒间形成的孔洞,为浇注时产生的液态、气态产物顺利排出提供了通道,有效改善了涂层的高温透气性能,保证了浇注时金属液的充型稳定,防止了铸件表面气孔、碳缺陷的产生。

参考文献:

- [1] 宋会宗,黄乃瑜,周静. 铸造涂料技术的发展趋势 [J]. 铸造, 1997, 10(3): 50.
- [2] 尹英杰,刘津东,张彩霞,等. 消失模铸造用涂料 [J]. 材料与工艺, 2006, 9(2): 39-42.
- [3] 王忠柯,黄乃瑜,佟天夫. 消失模铸造涂料的研究现状及发展 [J]. 特种铸造及有色合金, 1996, 10(3): 20-23.
- [4] 张忠明. 真空实型铸造用铸铁涂料的研制与应用 [J]. 铸造技术, 1994(1): 21-23.
- [5] 王桂红. 凸轮轴消失模铸造涂料的研制 [J]. 热加工工艺, 2008, 37(3): 22-24.
- [6] 黄建波,张留伟,汪磊. 铝合金消失模铸造用醇基涂料研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(3): 280-281.
- [7] 郭广思,贾伟涛. 消失模铸钢水基涂料的研制 [J]. 特种铸造及有色合金, 2011, 31(6): 42-45.
- [8] 尹英杰,刘津东,张彩霞,等. 消失模铸造用涂料 [J]. 材料与工艺, 2006, 9(2): 39-42.
- [9] 李远才. 铸造涂料及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [10] 高焱,焦红卫,范有雄,等. 亚铝晶石复合骨料水基消失模涂料的制备及其性能研究 [J]. 铸造, 2020, 69(11): 1207-1211.

Preparation and Properties of a Water-Based Lost Foam Coating for Cast Iron

WANG Tian-bao¹, YUAN Bo², HUANG Jian-bo³

(1. Inner Mongolia Vocational and Technical College of Transportation, Chifeng 024005, Inner Mongolia, China; 2. Wuhan City Vocational College, Wuhan 430064, Hubei, China; 3. Hubei Vocational College of Engineering, Huangshi 435003, Hubei, China)

Abstract:

Alumina spar powder, talc powder, kaolin and cryolite powder are used as composite refractory aggregates, quick-drying silica sol and polyvinyl alcohol (PVA) are used as composite binders, and sodium lignosulfonate and attapulgite are used as composite suspending agents, using the orthogonal test method and the range analysis method to determine the optimal ratio of each component in the water-based lost foam coating for cast iron. And the analysis results of tissue characteristics show that the comprehensive performance of the coating was good.

Key words:

alumina spar powder; talc powder; kaolin; cryolite powder; lost foam coating