

镁合金用水基消失模涂料的制备与优化

袁博^{1,2}, 黄建波³, 陈淑花¹

(1. 武汉城市职业学院, 湖北武汉 430064; 2. 武汉理工大学, 湖北武汉 430070;
3. 湖北工程职业学院, 湖北黄石 435003)

摘要: 针对镁合金消失模铸造特点, 选择镁砂粉、硅藻土、云母粉为耐火骨料, 通过改变耐火骨料的配比, 研究了骨料配比对涂料性能的影响。进行正交试验和极差分析, 对涂料悬浮剂、粘结剂各组分的加入量进行优化, 最终确定涂料的最佳配方, 制备出一种可用于镁合金的水基消失模铸造涂料。经过生产试验验证, 结果表明: 该配方涂料工艺性能良好, 铸件表面光滑, 无气孔、冷隔、粘砂及浇不足等铸造缺陷。

关键词: 镁合金; 消失模; 镁砂粉; 硅藻土; 云母粉

消失模铸造被称为“明天的铸造技术”和“铸造工业的绿色革命”^[1], 相比于砂型铸造、金属型铸造等传统的铸造工艺具有以下优点: 设计灵活、生产周期短、效率高、投资成本低、操作简便, 不仅适用于铸钢、铸铁, 也适用于铜、铝、镁等合金的铸造。

我国针对消失模铸造工艺的研究始于20世纪80年代, 经过几十年的发展, 目前成效显著, 已经具备一定的自主研发、生产的能力^[2-3], 针对消失模铸造涂料的性能测试方法也取得了一定程度的进展^[4], 但是针对镁合金用消失模涂料的研究较少。我国镁合金铸件生产厂家大多数采用国外进口或者自配涂料, 在使用过程中问题层出不穷, 如涂料可储藏时间短、透气性差、铸件表面缺陷、内部不致密等, 限制了我国镁合金消失模铸造行业的发展。所以, 研制出一种综合性能优良的镁合金用消失模涂料已成为当务之急。

镁合金是一种比重轻、比强度高、导热性能和切削性能较好的金属结构材料, 广泛应用于机械制造、汽车、航空航天、军事等领域。由于铸造镁合金件的浇注温度较低, 一般在720~750℃, 金属镁液的热容量小。浇注时, EPS泡沫迅速热解, 导致镁液冷却速度过快, 容易导致冷隔和浇不足等缺陷。根据文献[5], 模样与涂层具有较好的浸润性可使泡沫模样热解后的产物顺利排出, 减少铸造缺陷的产生, 部分行业专家采用在铸铝用消失模涂料中加入阻燃剂硼酸锌, 取得了较好的效果, 并申请了专利^[6]。通过查阅相关文献资料得知: 镁砂粉抗碱性熔渣的能力较强, 硅藻土具有较好的保温性能, 云母粉可明显提高涂层的附着力、高温强度并改善涂层抗热震性能, 以及防止涂料板结。

本研究选择镁砂粉、硅藻土、云母粉三种不同耐火骨料, 在确定耐火骨料中各组分的最佳配比后, 采用正交试验法, 对正交试验结果进行极差分析, 最终确定烷基膨润土、羧甲基纤维素钠(CMC)、糊精、水玻璃的最佳加入量, 最终研制一种综合性能优良的铸造镁合金用水基消失模涂料。

1 试验材料与方法

1.1 试验原材料

耐火骨料选用硅藻土(生土), 粒度325目; 煅烧镁砂粉, 粒度200目; 云母粉

作者简介:

袁博(1986-), 男, 博士生, 讲师, 研究方向为铸造工艺、铸造新材料。电话: 15807123867, E-mail: yuanboh@126.com

中图分类号: TG249.5
文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2020)03-0254-05

基金项目:

湖北省教育厅科研计划项目(B2019433); 武汉市市属高校产学研研究项目(CXY2018013)。

收稿日期:

2019-08-28 收到初稿,
2019-10-21 收到修订稿。

(颗粒状), 粒度200目。

消失模铸造对涂层强度、悬浮率有一定程度的要求, 为了保证涂料有足够的常温强度、高温强度, 粘结剂选用糊精和水玻璃搭配使用。悬浮剂为钠基膨润土(钠土)和羧甲基纤维素钠(CMC), 表面活性剂为T-80, 消泡剂为正丁醇, 阻燃剂选取硼酸锌, 防腐剂为苯甲酸钠, 载体为水。

1.2 原材料预处理

复合悬浮剂、复合粘结剂在使用前需要进行预处理, 首先按照表1中的质量配比将钠基膨润土、CMC、糊精分别制备成浆料甲液、乙液、丁液。

然后将甲液、乙液混合, 快速搅拌30 min (1 000 r/min), 用胶体磨研磨3次后静置24 h待用, 制得复合悬浮剂浆料丙液; 将制备而成的浆料丁液中加入水玻璃快速搅拌20~30 min (1 000 r/min), 制得复合粘结剂戊液。

1.3 涂料制备方法

为了使耐火骨料各组分均匀分散, 首先将已称量好的各耐火骨料依次加入到碾轮式混砂机中, 混碾20~30 min, 然后依次加入复合悬浮剂浆料丙液、复合粘结剂戊液、表面活性剂T-80、消泡剂正丁醇、阻燃剂硼酸锌、防腐剂苯甲酸钠以及适量水, 混碾1~2 h后, 将膏状涂料在桶中密封待用。

1.4 涂料主要性能测试方法

悬浮性: 采用量筒静置法。

条件粘度: 采用NDJ-79型旋转粘度计进行测定。

透气性: 在STZ型直接式透气性测定仪上测定。

附着量: 制备规格为120 mm × 60 mm × 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(密度 1.6 g/cm^3)中浸涂三次, 将其放入恒温干燥箱中(已设定温度为 $40 \text{ }^\circ\text{C}$)干燥2~4 h, 待涂层完全干透后, 称量出其总质量 M_2 , 则其附着量 $M=M_2-M_1$ 。

涂层厚度: 在规格为100 mm × 100 mm × 5 mm的载玻片上, 均匀涂覆一层涂料(流涂, 1.6 g/cm^3), 烘干后, 用游标卡尺测量任意5个位置的涂层厚度, 在去掉一个最大值、一个最小值后, 剩余三个数值取平均值即为涂层的厚度。

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^[7]。

2 耐火骨料比例的确定

作为涂料的主体部分, 耐火骨料的理化性质、骨料对比对涂料的性能有决定性的影响, 为了确定耐火骨料中各组分最佳配比, 现以镁砂粉为主加耐火骨料, 硅藻土和云母粉为辅加耐火骨料, 主加、辅加耐火骨料加入量分别占耐火骨料总质量的60%、40%, 其他各组分加入量相同, 共进行3组试验, 为了使涂料各性能测定值具有可比性, 按照表2(占耐火骨料总质量的百分比)将涂料配制好后, 统一调密度至 1.6 g/cm^3 , 然后分别测定各组涂料性能, 涂料性能测试结果如表3所示。

表1 原料预处理各组分质量配比
Table 1 Quality ratio of each component in raw material pretreatment

	浆料	钠基膨润土	CMC	糊精	水
甲液		1	0	0	10
乙液		0	1	0	50
丁液		0	0	1	30

表2 镁合金用水基消失模涂料配比
Table 2 Initial formulation of water-based lost foam coatings for magnesium alloys

编号	耐火骨料			悬浮剂		粘结剂		表面活性剂	消泡剂	阻燃剂	防腐剂	溶剂
	镁砂粉	硅藻土	云母粉	钠土	CMC	糊精	水玻璃	T-80	正丁醇	硼酸锌	苯甲酸钠	水
1	60	10	30	4	0.5	1	4	适量	适量	适量	适量	适量
2	60	20	20	4	0.5	1	4	适量	适量	适量	适量	适量
3	60	30	10	4	0.5	1	4	适量	适量	适量	适量	适量

表3 镁合金用水基消失模涂料主要性能测定值
Table 3 Main performances of water-based lost foam coatings for magnesium alloys

编号	耐火骨料	密度	24 h悬浮率	条件粘度	发气量	附着量	涂层强度	涂层厚度
		$/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$\%$	$/\text{s}$	$/(\text{mL} \cdot \text{g}^{-1})$	$/\text{g}$	$/\text{g}$	$/\text{mm}$
1	镁砂粉60%, 硅藻土10%, 云母粉30%	1.6	87	11.22	20.1	2.55	565	0.55
2	镁砂粉60%, 硅藻土20%, 云母粉20%	1.6	92	15.35	26.4	1.78	428	0.72
3	镁砂粉60%, 硅藻土30%, 云母粉10%	1.6	95	9.51	13.6	1.34	335	0.87

从表2、表3中试验数据可知,以上3组涂料中,在其他各组分加入量相同的情况下,不同的耐火骨料配比,涂料的各项性能差异较大。

首先,随着硅藻土加入量的增多,云母粉加入量的减少,涂料24 h悬浮率、涂层厚度指标逐渐增大,发气量、附着量、涂层强度三组指标值逐渐减小。其中第一组涂料的附着量、涂层强度指标好于后两组,第三组涂料的24 h悬浮率、条件粘度、发气量、涂层厚度指标好于前两组。主要原因是云母粉含水硅酸盐,遇高温时快速分解,快速分解出大量气体,从而使得涂层发气性数值偏高。

因涂料24 h悬浮率、条件粘度、发气量三种性能指标均可通过改变钠基膨润土、CMC、糊精、水玻璃的加入量来进行调节,涂层厚度指标可通过改变涂料浸涂的次数来进行调节,因此最终选择第一组作为耐火骨料的最佳配比,即镁砂粉60%、硅藻土10%、云母粉30%。

3 正交试验方案与结果

3.1 正交试验方案

因耐火骨料的最佳配比已经确定,为了探讨复合悬浮剂(钠基膨润土、CMC)、复合粘结剂(糊精、水玻璃)中各组分对镁合金用水基消失模涂料性能的影响规律,现以钠基膨润土、CMC、糊精、水玻璃作为因素水平表的四个因素,每因素选取三个不同水平,采用 $L_9(3^4)$ 正交表安排试验,共进行9次试验,并对各组涂料的24 h悬浮率、透气性、条件粘度、发气量、涂层强度、涂层厚度等性能进行测试。因素水平(占耐火骨料总质量的百分比)如表4所示,正交试验方案及结果如表5所示。

3.2 正交试验结果分析

为了探究复合悬浮剂、复合粘结剂中各组分对涂料24 h悬浮率、条件粘度、透气性、涂层强度、附着量、发气量等性能的影响规律,现对表4中的试验数据进行正交试验结果分析、极差分析,结果分别如表6、表7所示。

从表7可以看出,影响涂料24 h悬浮率的最显著性因素是钠土,其后依次是CMC、水玻璃、糊精。其主要原因是钠土具有较强的吸水性和膨胀性,能吸附自身重量8~15倍的水量,特别是经过活化处理的钠土浆料,具有较强的阳离子交换能力,在水介质中能分散成胶凝状和悬浮状,显著提高涂料的悬浮性能。

对于涂料条件粘度的影响因素顺序为: CMC > 钠土 > 糊精 > 水玻璃。其主要原因是CMC在水基涂料中会形成一种呈立体网状结构的透明胶体水溶液,具有

复杂的流变性质,会显著提高涂料的粘度。

对于涂层强度的影响因素顺序为: 水玻璃 > 糊精 > 钠土 > CMC; 附着量的影响因素顺序为: 糊精 > 水玻璃 > CMC > 钠土; 透气性的影响因素顺序为: 糊精 > 水玻璃 > CMC > 钠土; 涂料发气性的影响因素顺序

表4 $L_9(3^4)$ 因素水平

Table 4 $L_9(3^4)$ factor level /%

因素	悬浮剂		粘结剂	
	A (钠基膨润土)	B (CMC)	C (糊精)	D (水玻璃)
水平1	5	1	2	5
水平2	6	2	3	6
水平3	7	3	4	7

表5 正交试验方案及结果

Table 5 Orthogonal experimental scheme and results

试验方案	24 h 悬浮率/%	条件 粘度/s	透气性	涂层 强度/g	附着量 /g	发气量 /($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)
$A_1B_1C_1D_1$	93	9.75	78	485	1.22	15.9
$A_1B_2C_2D_2$	94	13.21	60	662	0.95	31.3
$A_1B_3C_3D_3$	96	9.3	46	856	1.78	30.3
$A_2B_1C_2D_3$	100	12.06	80	982	1.32	24.7
$A_2B_2C_3D_1$	98	16.32	43	563	1.15	39.5
$A_2B_3C_1D_2$	99	10.21	52	545	1.13	31.2
$A_3B_1C_3D_2$	93	14.58	42	576	1.89	33.3
$A_3B_2C_1D_3$	98	15.52	31	706	1.25	26.6
$A_3B_3C_2D_1$	100	10.55	125	581	0.72	33.4

表6 正交试验结果

Table 6 Results of orthogonal experiment

测试性能	同水 平均值	A (钠土)	B (CMC)	C (糊精)	D (水玻璃)
24 h悬浮率/%	k_1	94.3	95.3	96.7	97.0
	k_2	99.0	96.7	98.0	95.3
	k_3	97.0	98.3	95.7	98.0
条件粘度/s	k_1	10.75	12.13	11.83	12.21
	k_2	12.86	15.02	11.94	12.67
	k_3	13.55	10.02	13.40	12.29
透气性	k_1	61.3	66.7	53.7	82.0
	k_2	58.3	44.7	88.3	51.3
	k_3	66.0	74.3	43.7	52.3
涂层强度/g	k_1	667.7	681.0	578.7	543.0
	k_2	696.7	643.7	741.7	594.3
	k_3	621.0	660.7	665.0	848.0
附着量/g	k_1	1.32	1.48	1.20	1.03
	k_2	1.20	1.12	1.00	1.32
	k_3	1.29	1.21	1.61	1.45
发气量 /($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)	k_1	25.8	24.6	24.6	29.6
	k_2	31.8	32.5	29.8	31.9
	k_3	31.1	31.6	34.4	27.2

为：糊精 > CMC > 钠土 > 水玻璃。其主要原因是糊精是一种水溶性有机粘结剂，具有较好的湿强度和干强度，用于水基涂料时，可以显著提高涂料的浸透性、常温强度以及涂挂性能，浇注时，糊精迅速烧蚀，在涂层表面形成大量孔洞，从而使得涂层具有较好的透气性。

现不考虑钠土、CMC、水玻璃、糊精各组分之间的交互作用，涂料24 h悬浮率、透气性、涂层强度、附着量指标应尽量取最大值，因此应取 k_1 、 k_2 、 k_3 中最大的水平；条件粘度、发气性指标要求越小越好，因此应取 k_1 、 k_2 、 k_3 中最小的水平。

涂料24 h悬浮率最大的水平为 $A_2B_3C_2D_3$ ，条件粘度最小的水平为 $A_1B_3C_1D_1$ ，透气性最大的水平为 $A_3B_3C_2D_1$ ；涂层强度最大的水平为 $A_2B_1C_2D_3$ ，附着量最大的水平为 $A_1B_1C_3D_3$ ，发气性最小的水平为 $A_1B_1C_1D_3$ 。

在以上列举的6项性能指标中，24 h悬浮率、条件粘度性能指标只需要满足涂料使用要求即可。综合考量透气性、涂层强度、附着量、发气量等性能指标之

间的主次关系，其最佳组合为： $A_1B_1C_2D_3$ ，即涂料最佳配方如表8所示。涂料性能测试结果如表9所示。

4 生产验证

为了验证该涂料配方在实际生产中的应用性，现进行镁合金浇注试验，EPS泡沫模样如图1所示，首先将膏状涂料加水稀释，调密度至 1.6 g/cm^3 ，采用浸涂方式涂覆涂料，只需要一次即可在EPS泡沫模样表面涂覆一层均匀的涂层，涂料涂挂性良好，反复浸涂-烘干（ $\leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ）三次后，在 $730 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度下进行真空负压浇注，浇注后成形铸件如图2所示。

对已冷却至室温的镁合金铸件进行涂层清理，结果发现：①成形铸件表面光洁，无粘砂、气孔、冷隔、粘砂及充型不足等铸造缺陷；②铸件表面涂层呈龟裂状、起皮，只需要轻轻敲打，涂层即可自行脱落，易清理，能够很好地满足实际生产需要，经济性良好。

表7 极差分析
Table 7 Range analysis

极差	24 h悬浮率/%	条件粘度/s	透气性	涂层强度/g	附着量/g	发气量/($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)
R_A	4.7	2.80	7.7	75.7	0.12	6.0
R_B	3.0	5.00	29.7	37.3	0.36	7.8
R_C	2.3	1.57	44.7	163.0	0.61	9.8
R_D	2.7	0.46	30.7	305.0	0.42	4.7

表8 镁合金用水基消失模涂料最佳配方
Table 8 Optimal formulation of water-based lost foam coating for magnesium alloys

耐火骨料		悬浮剂		粘结剂		表面活性剂	消泡剂	阻燃剂	防腐剂	溶剂
镁砂粉	硅藻土	云母粉	钠土	CMC	糊精	水玻璃	T-80	正丁醇	硼酸锌	苯甲酸钠
60	10	30	5	1	3	7	适量	适量	适量	适量

表9 镁合金用水基消失模涂料性能测定值
Table 9 Properties of water-based lost foam coating for magnesium alloys

密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	24 h悬浮率/%	条件粘度/s	发气量/($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)	透气性	附着量/g	涂层强度/g
1.6	95	11.24	25.5	83	1.44	827



图1 泡沫模样
Fig. 1 Foam pattern

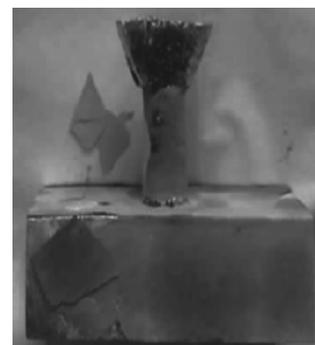


图2 铸件表面涂层状态
Fig. 2 Coating status on the surface of casting

5 结论

(1) 影响涂料悬浮率的最显著因素是钠土, 影响涂料条件粘度的最显著因素是CMC, 影响涂层强度的最显著因素是水玻璃, 影响涂料附着量、发气量、涂层透气性的最显著因素是糊精。

(2) 采用 $L_9(3^4)$ 正交试验, 对钠基膨润土、CMC、糊精和水玻璃的加入量进行优化, 得到该镁合金用水基消失模涂料的最佳配方为: 镁砂粉60%、硅藻

土10%、云母粉30%、钠土5%、CMC1%、糊精3%、水玻璃7%、T-80适量、正丁醇适量、硼酸锌适量、苯甲酸钠适量、水适量。

(3) 经过浇注试验验证, 该配方涂料涂挂性良好, 涂料可以均匀地依附在EPS模样表面, 涂挂性良好, 成形铸件表面光洁, 没有出现粘砂、气孔、冷隔、粘砂及充型不足等铸造缺陷, 涂层容易脱落, 易清理, 能够很好地满足实际生产需要, 经济性良好。

参考文献:

- [1] 宋会宗, 黄乃瑜, 周静一, 等. 铸造涂料技术的发展趋势 [J]. 铸造, 1997 (3): 50.
- [2] 叶升平, 吴志超. 我国三大类消失模铸件生产之现状 [J]. 特种铸造及有色合金, 2005, 25 (9): 557-559.
- [3] 梁光泽. 我国实型铸造的应用与发展 [J]. 特种铸造及有色合金, 2003 (2): 54-55.
- [4] 石晶玉, 黄天佑. 消失模铸造涂料性能测试方法的研究进展 [J]. 铸造, 2002, 51 (2): 76-78.
- [5] 董选普, 樊自田, 黄乃瑜, 等. 镁合金消失模铸造模样消失过程的研究 [J]. 铸造, 2005, 54 (4): 325-328.
- [6] 谭香玲, 肖泽辉. 镁合金消失模铸造涂料的研究发展 [J]. 铸造, 2007, 156 (2): 121-122.
- [7] 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.

Preparation and Optimization of Water-Based Lost Foam Coating for Magnesium Alloys

YUAN Bo^{1,2}, HUANG Jian-bo³, CHEN Shu-hua¹

(1. Wuhan City Vocational College, Wuhan 430064, Hubei, China; 2. Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China; 3. Hubei Engineering Vocational College, Huangshi 435003, Hubei, China)

Abstract:

According to the characteristics of magnesium alloy lost foam casting, magnesia powder, diatomite and mica powder were selected as refractory aggregates. By changing the proportion of refractory aggregates, the effect of aggregate ratio on the properties of the coating was studied. Then the orthogonal test and the range analysis were carried out to optimize the addition amount of each component in the coating suspending agent and the binder. Finally, the optimum formulation of the coating was determined, and a water-based lost foam casting coating which can be used for the magnesium alloy was prepared. Actual production verified that the formulation has good process performance, and the castings produced have smooth surface, no such defects as blowhole, cold lap, burning-on and misrun.

Key words:

magnesium alloy; lost foam; magnesia powder; diatomaceous earth; mica powder