

# 铝合金金属型铸造用水基涂料研究

汪超台<sup>1</sup>, 袁博<sup>2</sup>, 黄建波<sup>3</sup>

(1. 乐山职业技术学院, 四川乐山 614013; 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:** 选用硅藻土、海泡石、高岭土、滑石粉作为复合耐火骨料, 以水玻璃和快干硅溶胶作为复合粘结剂, 海藻酸钠和羧甲基纤维素钠 (CMC) 作为复合悬浮剂, 采用正交试验法和极差分析法确定了铝合金金属型铸造用水基涂料中各组份的最优配比, 通过对涂料各项性能进行测定和试验验证发现, 所得的最佳配方涂料性能良好, 能够应用于实际生产中。

**关键词:** 铝合金; 金属型; 硅藻土; 海泡石; 水基涂料

近年来, 随着我国汽车工业的快速发展, 乘用车的轻量化成为汽车行业发展的主要方向之一, 铝合金铸件的产量逐年增加。这些铝合金铸件大多采用金属型铸造, 金属型铝合金铸件质量优劣与否, 涂料是关键, 直接影响着铸件表面质量和尺寸精度<sup>[1]</sup>。当前我国金属型铝合金铸造企业中, 大部分采用进口涂料, 价格昂贵, 企业生产成本较高, 中小型企业依靠生产经验, 采用自配涂料, 而自配涂料普遍存在使用寿命短、铸件表面质量差、铸件强度低等问题<sup>[2-3]</sup>。因此, 为获得优质金属型铝合金铸件, 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、绿色环保的铸造用铝合金金属型涂料。本试验选用当前我国市场中使用较多的德国产CILLOLIN AL 285GN型铝合金用金属型涂料为标准参照物进行对比性试验, 该涂料性能参数如下: 24 h悬浮性为92%、粘度19.7 s, 发气量34.5 g/mL, 涂层附着强度较高, 一般在金属型上喷涂一次, 可连续反复浇注10次而中途不用补喷涂料。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验原材料

(1) 耐火骨料。硅藻土: 吉林产, 灰白色, 粒度325目; 海泡石: 安徽产, 粒度320目, 纯度 $\geq 85\%$ ; 高岭土: 山西产, 浅黄色, 粒度325目, 纯度 $\geq 95\%$ ; 滑石粉: 河南产, 白色, 粒度300目。

(2) 粘结剂。选用水玻璃和快干硅溶胶作为复合粘结剂。

(3) 悬浮剂。选用海藻酸钠和羧甲基纤维素钠 (CMC) 作为复合悬浮剂。

(4) 载体。在涂料载体中, 水具有价廉、来源广、易获取、绿色环保的特性, 因此本试验选用自来水作为载体。

(5) 其他组分。选用脂肪醇聚氧乙烯醚 (JFC) 作为表面活性剂, SPA-202为消泡剂 (聚醚消泡剂), 氧化铁 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) 作为氧化添加剂。

### 1.2 原材料预处理

海藻酸钠预处理: 将海藻酸钠与水按照1:10质量比加入MYP19150型电动搅拌机中, 在1 000 r/min的速度下快速搅拌成浆料, 静置24 h待用。

羧甲基纤维素钠 (CMC) 预处理: 首先称取适量的羧甲基纤维素钠 (CMC),

作者简介:

汪超台 (1981-), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向铸造工艺、铸造新材料。

E-mail: 40433134@qq.com

中图分类号: TG211<sup>+</sup>.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

04-0540-05

基金项目:

武汉黄鹤英才(优秀青年人才)资助、武汉市市属高校产学研研究项目(CXY202219); 湖北省教育厅科研计划项目(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:

2023-07-21 收到初稿,

2023-12-19 收到修订稿。

按照CMC：水=1：19的质量比将CMC加入到沸水中，搅拌至透明状后，最终配制成5%浓度的CMC水溶液，静置72 h待用。

### 1.3 涂料制备方法

涂料的配制设备对涂料的性能和使用效果影响很大<sup>[4]</sup>，本涂料采用球磨机制备，首先将称量好的耐火骨料加入球磨机中快速球磨0.5~1 h，然后依次加入复合粘结剂、复合悬浮剂、表面活性剂JFC、SPA-202消泡剂、以及适量水球磨4~6 h，然后用胶体磨研磨1~2 h，制成成品涂料。

### 1.4 涂料性能的测试方法

密度采用量筒、天平配合称量法测定<sup>[5]</sup>；悬浮率采用具塞量筒沉淀法测定；条件粘度采用涂6粘度计测定；发气量的测试：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 $(1 \pm 0.01)$  g的样品5个，依次在GET-III型智能造型材料发气性测定仪上进行发气量测定，5个数值在去掉其最高值和最低值后，剩余3个检测数据的平均值即为涂料的发气量。

涂层附着强度：采用冲击测定法<sup>[6]</sup>测量涂层与金属型之间的附着强度。首先将尺寸为300 mm×300 mm的薄钢板加热至 $(200 \pm 5)$  °C，采用0.5~0.6 MPa的压力喷涂，喷涂时涂料喷涂方向与薄钢板表面呈45°夹角，喷嘴距薄钢板表面约0.4~0.5 m，在钢板表面均匀喷涂一层厚度为0.5~0.7 mm的涂料，待涂层烘干后用300 g圆形重物从60 cm高处自由落下连续冲击钢板背面10次，根据钢板表面涂层的剥落情况，将涂层附着强度依次分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ四个等级，经肉眼观察涂层表面完整，无剥落为Ⅰ级；涂层表面有轻微脱落，剥落面积<10%时为Ⅱ级；涂层表面剥落面积介于10%~30%时为Ⅲ级；涂层大面积脱落，剥落面积>30%时为Ⅳ级。

高温激热抗裂性：首先将涂料喷涂于已加热至 $(200 \pm 5)$  °C尺寸为300 mm×300 mm的金属板上，待涂层完全干透后，将金属板试样置于700 °C的箱式加热炉中急热保温2 min，迅速打开炉门观察涂层是否有裂纹以及裂纹的大小和数量。对涂层的裂纹情况可以按

以下4级评定<sup>[7]</sup>：①Ⅰ级：表面光滑没有裂纹，或者只有特别细的裂纹，基体和涂料之间没有剥离的现象；②Ⅱ级：涂层上有细小的网状或者树枝状裂纹，裂纹宽度<0.5 mm，基体和涂料之间没有剥离的现象；③Ⅲ级：涂层有网状或者树枝状裂纹，宽度<1 mm，裂痕比较深，没有贯通的粗裂纹，基体和涂料之间没有剥离的现象；④Ⅳ级：涂层上有网状或者树枝状的裂纹，宽度>1 mm，有贯通的裂纹，基体和涂料间有剥离的现象。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 耐火骨料配比的选择

在涂料各组份中，耐火骨料是金属型铸造涂料的主体，具有隔离、绝热、降低铸件表面粗糙度、使铸件容易从铸型分离等作用。当前，金属型涂料中占主流的耐火骨料有铝矾土、海泡石、石墨粉、锆英粉、硅藻土、滑石粉、高岭土等，或是这几种骨料的组合<sup>[8]</sup>。

据相关文献资料介绍<sup>[9]</sup>，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以上的耐火骨料搭配使用，用于改善涂料的综合性能。由于铝合金用金属型铸造涂料对涂层附着强度、发气量、透气性等性能指标有较高的要求。因此本试验从金属型涂料常用耐火骨料中选用硅藻土、海泡石，以及高岭土、滑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份之间的最佳配比，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1、表2可以看出，在以上三组涂料中，在涂料其他组份相同的情况下，改变涂料中耐火骨料配比，涂料性能差异明显：第1组涂料密度最大、条件粘度最大、发气量最大、涂层附着强度最高；第2组涂料的高温抗裂性最优；第3组涂料的密度最小、24 h悬浮率最高、条件粘度最小、发气量最小；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800~900 °C温度下失去结晶水，其密度大于硅藻土，硅藻土可显著改善涂料的保温性能，随着硅藻土加入量的增加，滑石粉加入量的减少，涂料密度呈下降趋

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

编号	主加耐火骨料		辅加耐火骨料		粘结剂		悬浮剂		表面活性剂	消泡剂	氧化剂
	硅藻土	海泡石	高岭土	滑石粉	水玻璃	快干硅溶胶	海藻酸钠	CMC			
1	40	40	5	15	3	3	4	2	适量	适量	适量
2	50	30	10	10	3	3	4	2	适量	适量	适量
3	60	20	15	5	3	3	4	2	适量	适量	适量

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

表2 铝合金用金属型水基铸造涂料主要性能测定值

Table 2 Main performance measurement values of the water-based coatings for the aluminum alloys metal mold casting

编号	耐火骨料	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	24 h悬浮率/%	条件粘度/s	发气量/(mL·g <sup>-1</sup> )	涂层附着强度	高温抗裂性
1	40%的硅藻土+40%的海泡石	1.63	92	22.1	41.3	I	III
	石+5%高岭土+15%滑石粉						
2	50%的硅藻土+30%的海泡石	1.48	95	14.7	33.5	II	II
	石+10%高岭土+10%滑石粉						
3	60%的硅藻土+20%的海泡石	1.36	98	12.2	29.7	II	IV
	石+15%高岭土+5%滑石粉						

势、24 h悬浮率显著提高、发气量逐渐减小。综合对比分析发现,第3组涂料在涂料密度、24 h悬浮率、条件粘度、发气量指标上均能满足铝合金用金属型水基铸造涂料性能要求,但是在涂层附着强度、高温抗裂性指标上还存在进一步优化空间,因此本试验选用硅藻土60%、海泡石20%、高岭土15%、滑石粉5%的耐火骨料配比。

## 2.2 最佳配方的确定

在以上耐火骨料配比的试验中,通过对涂料的各项主要性能指标进行综合分析发现,三组涂料的24 h悬浮率均在92%以上,均能较好满足金属型涂料的性能要求,并最终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、复合悬浮剂各组份的最优加入量,现采用四因素三水平L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>)正交试验法,以涂料条件粘度、发气量、涂层附着强度、高温抗裂性四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,正交试验方案及结果如表4所示。

为更加直观地对涂料的涂层附着强度、高温抗裂

表3 因素水平表L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>)Table 3 Factors and levels table L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>) w<sub>B</sub>/%

因素	水玻璃(A)	快干硅溶胶(B)	海藻酸钠(C)	CMC(D)
水平1	4	2	4	2
水平2	6	3	5	3
水平3	8	4	6	4

性指标进行数据分析,现依据其等级高低,依次对涂层附着强度的四个等级I、II、III、IV依次赋值7、5、3、1,高温抗裂性的4个等级I、II、III、IV也依次赋值7、5、3、1,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,其中影响涂料条件粘度的最显著性因素是快干硅溶胶,各因素的影响顺序依次为:快干硅溶胶>CMC>水玻璃>海藻酸钠,对条件粘度性能指标

表4 正交试验方案及结果

Table 4 Orthogonal experiment scheme and results

试验方案	条件粘度/s	发气量/(mL·g <sup>-1</sup> )	涂层附着强度	高温抗裂性
A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub> D <sub>1</sub>	5.6	19.8	I	I
A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub> D <sub>2</sub>	13.1	21.3	I	I
A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub> D <sub>3</sub>	17.2	24.7	I	I
A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub> D <sub>3</sub>	9.1	28.4	III	I
A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub> D <sub>1</sub>	7.1	33.5	I	II
A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub> D <sub>2</sub>	8.3	18.2	I	IV
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub> D <sub>2</sub>	7.2	19.6	III	III
A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub> D <sub>3</sub>	8.9	35.3	II	II
A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub> D <sub>1</sub>	9.6	30.5	III	II

表5 正交试验结果分析

Table 5 Analysis of the orthogonal experiment results

性能指标		A (水玻璃)	B(快干 硅溶胶)	C(海 藻酸钠)	D (CMC)
条件粘度/s	k <sub>1</sub>	12.0	7.3	7.6	7.5
	k <sub>2</sub>	8.2	9.7	10.6	9.6
	k <sub>3</sub>	8.6	11.7	10.5	11.7
	R	3.8	4.4	3.0	4.2
发气量/(mL·g <sup>-1</sup> )	k <sub>1</sub>	21.9	22.6	24.4	27.9
	k <sub>2</sub>	26.7	30.0	26.7	19.7
	k <sub>3</sub>	28.5	24.5	25.9	29.5
	R	6.6	7.4	2.3	9.8
涂层附着强度	k <sub>1</sub>	5.0	2.3	4.3	3.7
	k <sub>2</sub>	3.7	4.3	2.3	3.7
	k <sub>3</sub>	1.7	3.7	3.7	3.0
	R	3.3	2.0	2.0	0.7
高温抗裂性	k <sub>1</sub>	7.0	5.7	4.3	5.7
	k <sub>2</sub>	4.3	5.7	6.3	3.7
	k <sub>3</sub>	4.3	4.3	5.0	6.3
	R	2.7	1.4	1.7	2.6

而言,较优方案是A<sub>2</sub>B<sub>1</sub>C<sub>1</sub>D<sub>1</sub>;影响涂料发气量的最显著性因素是CMC,各因素的影响顺序依次为:CMC>

快干硅溶胶>水玻璃>海藻酸钠,对发气量而言较优方案是 $A_1B_1C_1D_2$ ;影响涂层附着强度的最显著性因素是水玻璃,各因素的影响顺序依次为:水玻璃>快干硅溶胶>海藻酸钠>CMC,对涂层附着强度而言较优方案是 $A_1B_2C_1D_2$ ;影响涂料高温抗裂性的最显著性因素是水玻璃,各因素的影响顺序依次为:水玻璃>CMC>海藻酸钠>快干硅溶胶,对高温抗裂性而言较优方案是 $A_1B_1C_2D_3$ 。

考虑到金属型水基涂料采用喷涂方法施涂,涂

料粘度过大,不利于雾化和喷涂,为了方便涂料的施涂,以及涂层具有一定的使用寿命,涂料粘度不能过大,而且涂层应具有一定的强度,因此在金属型涂料的各项性能指标中,首先应保证的是条件粘度指标,其次为涂层附着强度、发气量、高温抗裂性,综合考虑,最终确定了复合粘结剂、复合悬浮剂中各组份的最佳配比为 $A_1B_1C_1D_2$ ,即水玻璃4%、快干硅溶胶2%、海藻酸钠4%、羧甲基纤维素钠(CMC)3%,涂料各组份配比如表6所示,其性能测试结果如表7所示。

表6 铝合金用金属型水基铸造涂料配方  
Table 6 Formula of the water-based coating for the aluminum alloy metal mold casting

耐火骨料/%				粘结剂/%		悬浮剂/%		表面活性剂	消泡剂	氧化剂	载体
硅藻土	海泡石	高岭土	滑石粉	水玻璃	硅溶胶	海藻酸钠	CMC	JFC	正丁醇	$Fe_2O_3$	水
60	20	15	5	4	2	4	3	适量	适量	适量	适量

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

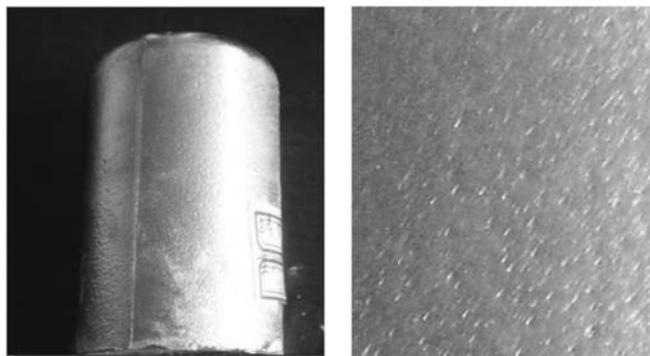
表7 铝合金用金属型水基铸造涂料性能测定值  
Table 7 Properties of the water-based coatings for the aluminum alloys metal mold casting

编号	密度/( $g \cdot cm^{-3}$ )	24 h悬浮率/%	条件粘度/s	发气量/( $mL \cdot g^{-1}$ )	涂层附着强度	高温抗裂性
1	1.45	97	8.2	21.7	I	II

### 3 浇注试验

为了验证该涂料配方在实际生产中的可行性,现进行铝合金连续浇注试验,按照表6中的涂料配方将涂料配制好,调涂料密度至 $1.45 g/cm^3$ 待用,采用喷涂法进行涂料施涂,用于浇注金属型铝合金铸件,浇注温度( $730 \pm 10$ ) $^{\circ}C$ ,成形铸件如图1所示。在经过16次浇注后涂层表面均无剥落、无起皮现象,从第17次开始,涂层开始有轻微起皮现象,其连续浇注次数达16

次,结合表7中涂料各性能测定值可知:配方涂料在24 h悬浮率、条件粘度、发气量、连续浇注次数等性能指标上均要优于德国产CILLOLIN AL 285GN型铝合金用金属型涂料,能很好地满足铝合金金属型铸造水基涂料的基本要求。试验结果表明,成形铸件表面光洁、无气孔、尺寸精度较好,能够很好地满足实际生产需要,节省了清理工时,具有较好的经济实用性。



(a) 浇注的铝合金铸件

(b) 铸件表面放大图

图1 浇注的铝合金铸件表面图

Fig. 1 Surface images of the aluminum alloy casting

## 4 结论

(1) 采用极差分析法发现：影响涂料性能粘度、发气量、涂层附着强度、高温抗裂性的最显著性因素分别为快干硅溶胶、CMC、水玻璃、海藻酸钠。

(2) 本试验铝合金用金属型水基铸造涂料最优配比为硅藻土60%、海泡石20%、高岭土15%、滑石粉5%，复合粘结剂、复合悬浮剂中各组份的最优加入量

分别为水玻璃4%、快干硅溶胶2%、海藻酸钠4%、羧甲基纤维素钠(CMC)3%，经过对最优涂料各项性能指标进行测定发现，涂料综合性能良好。

(3) 通过生产试验性验证发现，成形铸件表面光洁、无气孔、尺寸精度较好，能够很好地满足实际生产需要，节省了清理工时，具有很好的经济实用性。

### 参考文献：

- [1] 吕小艳. 铸造用铝合金金属型涂料的研究 [D]. 武汉：湖北工业大学，2009.
- [2] 姜不居. 铸造手册：特种铸造 [M]. 北京：机械工业出版社，2014.
- [3] 桂全红. 金属型铸造涂料在铝合金铸造中的应用 [J]. 铸造工程，2003 (3)：29-30.
- [4] 李远才. 铸造涂料及应用 [M]. 北京：机械工业出版社，2007，45-85
- [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] 蔡振升. 实用铸造耐火材料 [M]. 北京：冶金工业出版社，1994.
- [7] 刘瑞玲，范金辉. 铸造实用数据速查手册 [M]. 北京：机械工业出版社，2006.
- [8] 蒋宗宇，汪京心，杨永涛，等. 缸套离心铸造涂料的研制 [J]. 铸造，1997 (10)：31-33.
- [9] 杨哲，汪磊. 铸钢用水基消失模铸造涂料研究 [J]. 铸造，2018，67 (12)：1076-1079.

---

## Research on Water-Based Coatings for Aluminum Alloys Metal Mold Casting

WANG Chao-tai<sup>1</sup>, YUAN Bo<sup>2</sup>, HUANG Jian-bo<sup>3</sup>

(1. Leshan Vocational and Technical College, Leshan 614013, Sichuan, China; 2. Wuhan City Vocational College, Wuhan 430064, Hubei, China; 3. Hubei Engineering Vocational College, Huangshi 435003, Hubei, China)

### Abstract:

Using diatomite, sepiolite, kaolin and talc as composite refractory aggregate, water glass and quick-drying silica sol as composite binder, sodium alginate and sodium carboxymethyl cellulose (CMC) as composite suspension agent, the optimal ratio of each component of metal mold water-based casting coating for aluminum alloy was determined by orthogonal test and range analysis method. The properties of the coatings were measured and verified by experiments. It was found that the best formulation of the coatings had good properties and could be used in practical production.

### Key words:

aluminum alloy; metal mold; diatomaceous earth; sepiolite; water-based coating

---