

[文章编号] 1004-0609(2002)02-0279-05

# 涂料对消失模铝合金铸件孔隙率的影响<sup>①</sup>

吴国华<sup>1</sup>, 刘子利<sup>1</sup>, 刘满平<sup>1</sup>, 丁文江<sup>1</sup>, 罗吉荣<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学 金属基复合材料国家重点实验室, 上海 200030; 2. 华中理工大学 材料学院, 武汉 430074)

**[摘要]** 利用 HST-2 型消失模涂料高温性能测试仪研究了涂料组成、涂层厚度、透气性、温度等对聚苯乙烯热解产物通过消失模涂层的传输特性的影响。结果表明: 增加云母粉、珠光粉加入量及涂层厚度, 涂层透气性下降, 热解产物传输曲线的峰值上升, 传输时间增长。探讨了模样热解产物通过涂层的传输行为对消失模铝铸件孔隙率的影响。研究发现, 热解产物传输曲线峰值高、传输时间长, 有利于减少铝件的孔隙率。当热解产物传输曲线的峰值及传输时间分别达到 0.412kPa 和 48.3s 以上时, 铝铸件的针孔率可达到一级。实验结果表明, 自制的 HW-1 涂料的传输性能可与美国 Ashland 涂料的相当。

**[关键词]** 铝合金; 消失模铸造; 热解产物; 传输特性

**[中图分类号]** TG 249.6

**[文献标识码]** A

消失模铸造(LFC)技术是铸造工艺的一个重要发展方向, 被誉为二十一世纪的铸造技术。但对于铝合金 LFC 工艺而言, 消失模铸造过程中泡沫塑料模样热解产生的气态或液态产物若不能及时有效地通过涂料而排出, 则可能卷入铝液中而增加铸件的针孔<sup>[1~9]</sup>。当前, 消失模铸造铝件针孔是 LFC 技术推广的一大难题。而目前缺乏有关聚苯乙烯模样热解产物通过涂料的传输行为及其对铝铸件针孔影响研究的报道, 本文作者针对铝合金消失模铸造特点, 研究了聚苯乙烯热解产物通过涂料的传输行为及其对消失模铸造铝合金针孔的影响, 以便为进一步减少消失模铸造铝件的针孔提供理论依据和技术支持。

## 1 实验方法

实验用 ZL104 铝锭的化学成分为: 9% Si, 0.5% Mn, 0.22% Mg, 0.45% Fe, 其余为 Al。合金在 5 kW 电阻坩埚炉中熔化、保温。坩埚为 16# 石墨坩埚, 熔化 3 kg 铝液。热电偶插入铝液中, 通过自动控温仪控制铝液温度。使用自制的多孔头吹氩装置对铝液进行吹氩精炼。

消失模铸造的模样由聚苯乙烯泡沫塑料板材切割而成, 模样尺寸为 210 mm × 60 mm × 20 mm。聚苯乙烯模样的密度为 20 kg/m<sup>3</sup>, 水平放置侧注。在

模样表面涂挂上自制的铝合金消失模涂料, 涂料密度为 1.30 × 10<sup>3</sup> kg/m<sup>3</sup>, 之后模样放入 55~60 °C 的烘箱中烘干 24 h。涂层厚度为 0.2~0.3 mm。模样簇水平放入 40 cm × 40 cm × 50 cm 的钢制砂箱中, 造型采用 150~300 μm 的江西都昌砂, 由三维振动台紧实型砂。

金相分析试样从浇注试样的中部截取, 利用与 Olympus PM3 金相显微镜相连的 Leco 图像分析仪定量分析铝件的孔隙率。

## 2 涂料性能测试

### 2.1 裂解产物的传输特性

采用华中理工大学研制的 HST-2 型消失模涂料高温性能测试仪研究热解产物通过涂料的传输特性<sup>[10]</sup>, 其原理如图 1 所示。整个试验仪器由 4 部分组成: 一是涂层试样; 二是加热炉, 提供试验所需的恒定的高温环境; 三是气路部分, 主要向涂层试样提供所需的气体压力信号; 四是数据采集系统, 采集、处理、显示试验数据和试验结果。首先制出带园柱柄的 d30 mm 的球形聚苯乙烯泡沫塑料(EPS)试样, 然后把它插入到陶瓷管的一端, 之后在试样表面涂挂涂料。涂挂涂料的试样放入 55~60 °C 的烘箱中烘干 1 h。把烘干后的涂料试样快速插入已升至 800 °C 的管式炉内, 涂壳内的聚苯乙烯

① [基金项目] 教育部科学技术重大研究资助项目(00-013)

[收稿日期] 2001-06-04; [修订日期] 2001-09-30

[作者简介] 吴国华(1964-), 男, 副教授, 博士。

(EPS)在高温作用下,开始液化、裂解。裂解产物通过涂层向外传输并在整个气路中形成一定的压力,该压力通过压力变送器和数据采集仪测试处理后,利用裂解产物压力变化曲线上的峰值  $p_{max}$  以及裂解产物排出的时间  $t$  这两个特征参数来描述裂解产物通过涂层的传输特性。

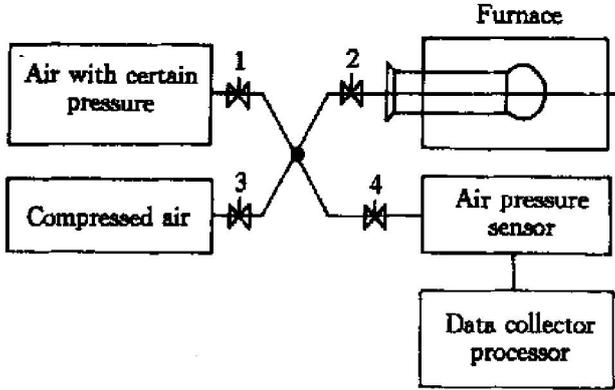


图1 消失模涂料多功能性能测试仪原理图

Fig.1 Diagram of property test of LFC coating (1~4: Valves)

1) 压力变化曲线的峰值  $p_{max}$

将裂解产物压力变化过程中的最大值定义为压力变化曲线的峰值  $p_{max}$ 。该值的大小表示裂解产物在涂壳内形成的最高压力。 $p_{max}$ 的大小可以说明气态裂解产物通过涂层排出的情况:如果排出速度较快,裂解产物在涂壳内积累较少, $p_{max}$ 值较低;反之, $p_{max}$ 值较高。

2) 裂解产物排出的时间  $t$

气体压力由急速下降转为平缓变化意味着涂壳内的气体已经大部分排出,因此,取裂解气体压力由急速下降转为平缓变化的时间作为裂解产物排出的时间  $t$ 。由于涂壳内球形 EPS 模样的体积和质量在发泡过程中控制为相同值,因此,裂解产物排出的时间  $t$  可以说明裂解产物通过涂层的难易程度,时间越短,说明裂解产物越容易通过涂层。

2.2 透气性测试

采用 HST-2 型消失模涂料高温透气性测试仪测试涂料高温透气性,把烘干后的涂料试样放入已升到一定温度的管式炉中,待 EPS 燃烧完毕后,关闭阀 2 和 4,打开阀 1,控制阀 3 以得到 6 kPa 压力的空气。关闭阀 3,打开阀 1,2 和 4,开始数据采集系统,让初压一定、体积一定的气体通过涂层,利用压力变送器和数据采集系统测试并记录气体压力的变化,绘制出  $p-t$  曲线。通过键盘输入涂层厚度  $h$  后,数据采集系统自动利用计算机程序根据式

(1) 计算透气性值:

$$K = \frac{2(p_b - p_e) h V}{(p_e - p_0)(p_b - p_0) A t_e} \quad (1)$$

式中  $p_e$ —气体的终气压(绝对压力), Pa;  $p_0$ —外界气压, Pa;  $p_b$ —气体的初气压(绝对压力), Pa;  $h$ —涂层厚度, cm;  $V$ —储气罐容积,  $cm^3$ ;  $A$ —涂层有效通气面积,  $cm^2$ ;  $t_e$ —从  $p_b$  降至  $p_e$  所需时间, min;  $K$ —涂层透气率,  $cm^2/(Pa \cdot min)$ 。

3 传输特性

典型的传输曲线如图 2 所示。图 2 说明了试验中测出的裂解气体压力随时间的变化情况。由图 2 可见,涂壳内的气体压力达到最大值后,快速下降。这可以解释为涂壳和球形 EPS 模样放入管式炉后,在外部高温的激热下,热量由涂层导入,模样受热刚开始软化,模样泡孔中的空气和发泡剂等开始逸散,即传感器感受因模样开始软化而产生的气压。随时间延长,传感器所能感受到的空气和发泡剂等越来越多,于是气压越来越高,直至出现脉冲或拐点。与此同时,涂层内的有机物氧化消失,提高了涂层的高温透气率;另一方面,泡沫塑料的萎缩增大了涂层的透气面积。由于此时 EPS 尚未剧烈裂解,涂壳内气体压力增大的速率小于涂壳内气体压力减少的速率,气体的压力上升后开始下降。

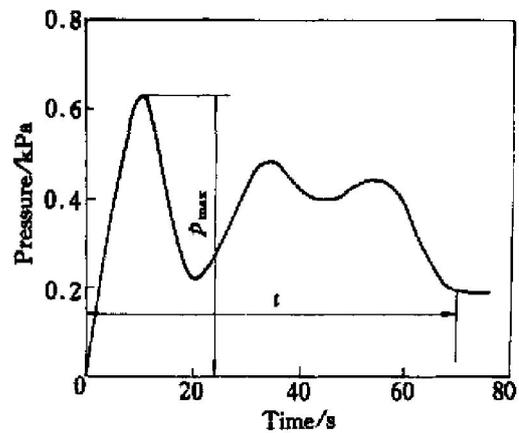


图2 典型传输曲线

Fig.2 Typical transfer curve

由于涂层内的温度一直在上升,当涂壳内的 EPS 开始剧烈气化、裂解时,大量气体产生,气体压力再次上升到峰值,当涂层内的 EPS 大部分排出后,气体压力下降。之后,在上述各种因素的综合作用下,使气压发生波动。由该曲线的形成可以看出,压力变化曲线所反映的压力升降与涂壳内 EPS

的裂解过程及其裂解产物通过涂层的传输密切相关。热解产物气体压力的大小取决于气体产生的速度和气体通过涂层的逸出速度。

消失模铸造涂料层的成膜物质主要是耐火粉料, 固体耐火材料颗粒在粘结剂的作用下堆积而形成涂层。因此, 对 EPS 裂解产物扩散过程起决定作用的是这层耐火粉料的物理或孔隙特征。不同的骨料搭配在一起所形成的涂层, 其孔隙特征不同, 从而对裂解产物的扩散过程及涂料的其它性能产生一定的影响。

骨料珠光粉、云母粉对热解产物传输特性的影响如图 3, 4 所示。所用的涂料配方是以自制的 HW-1 涂料为基础, 变化其中的组元而得到。HW-1 涂料的配方为硅藻土 40%, 珠光粉 60%, 无机粘结剂 9%, 有机粘结剂 2%, PVC 10%, CMC 0.3%, 凹凸棒土 2%, 云母粉 40%, JFC 0.03%, 即硅藻土+ 珠光粉= 100%, 其它组分为硅藻土与珠光粉总量的质量百分比。随着珠光粉、云母粉加入量的增加, 传输曲线峰值增加, 传输时间延长。这是由于珠光粉和云母粉均为片状骨料, 且颗粒细小, 随

着加入量的增加, 涂层内的孔隙率减少, 气态产物排出涂层的阻力增加, 即难以排出涂层。以致涂壳内的气压较大, 且排出时间较长。

涂层透气率对裂解产物传输特性的影响如图 5 所示, 涂层厚度均为 0.3 mm。可以看出, 高温透气率增加后, 压力变化曲线的峰值降低, 裂解产物的排出时间减少。这说明随涂层高温透气率的增大, 涂层滞留裂解产物的能力降低, 涂层排出裂解产物的能力增加, 裂解产物很快排出。事实上涂层透气性反映了涂层的孔隙特征, 涂层厚度相同时, 涂层透气性越好, 气体通过涂层时的阻力越小, 裂解产物越容易通过涂层, 在涂壳内形成的压力较低。

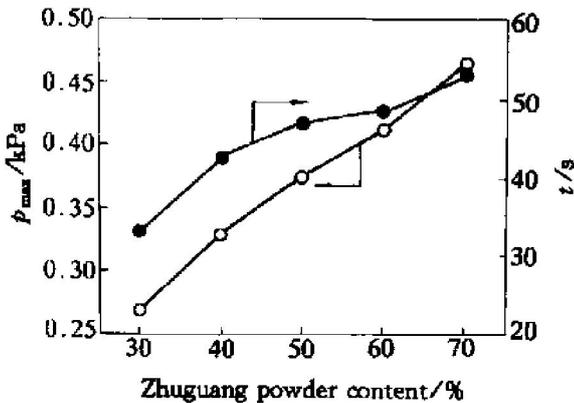


图 3 珠光粉含量对传输特性的影响

Fig. 3 Effect of Zhuguang powder content on transfer properties

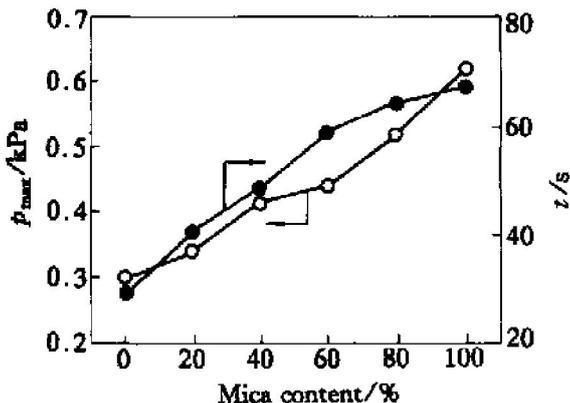


图 4 云母粉含量对传输特性的影响

Fig. 4 Effect of mica content on transfer properties

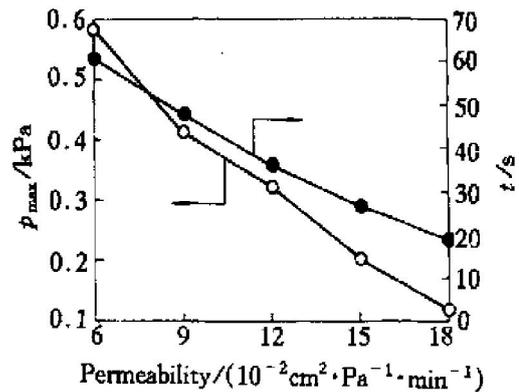


图 5 透气性对传输特性的影响

Fig. 5 Effect of permeability on transfer properties

涂层厚度对裂解产物传输特性的影响如图 6, 7 所示。涂层厚度增加后, 压力变化曲线的峰值明显增大, 这说明涂层的厚度增大后, 涂层排出裂解产物的能力降低, 裂解产物不能及时排出。涂壳内的气体压力上升, 裂解产物排出的时间增加说明, 涂层厚度增加后, 涂层阻碍或滞留裂解产物的能力增加, 使液态裂解产物在较长的时间内排出。从图 6, 7 还可以看出温度对传输特性的影响, 随着温度的

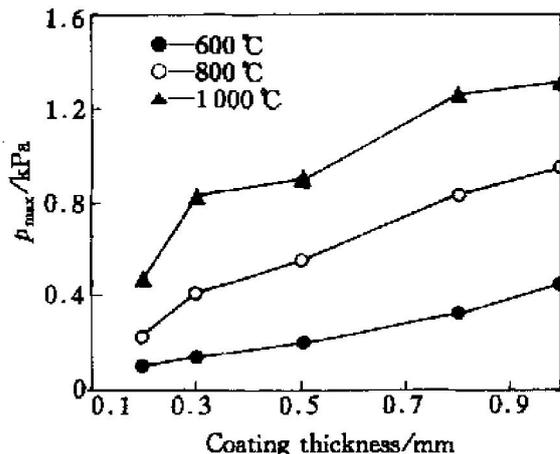


图 6 涂层厚度对峰值的影响

Fig. 6 Effect of coating thickness on peak values

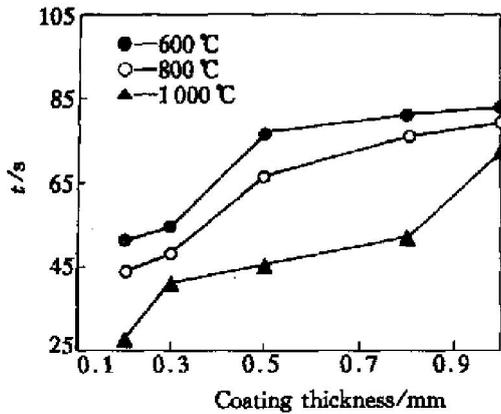


图7 涂层厚度对传输时间的影响

Fig. 7 Effect of coating thickness on transfer time

升高, 传输曲线峰值增加, 传输时间减少。这有两方面的原因: 一方面在较高温度下聚苯乙烯热解快, 发气多; 另一方面, 涂料中的有机物燃烧较为完全, 涂层中的孔隙率增加, 增加了热解产物的传输速率, 故传输曲线峰值高, 传输时间短。

#### 4 传输行为对铝铸件针孔的影响

从前面的有关热解产物的传输特性的研究结果可以看出, 涂料的组成、涂层厚度、温度等对它们均有影响。表1所示为几种涂料的传输特性曲线参数及其浇注的铝件的孔隙率。可以看出, 传输行为不同的涂料其对铝件针孔的影响是不同的。传输曲线的峰值越高、传输时间越长, 则铝件的孔隙率越低。在铝液充型过程中, EPS 模样在液态金属的热作用下, 先萎缩再液化, 后进入裂解过程。裂解产物中有液态产物、气态产物和部分固态产物(单质碳)<sup>[11, 12]</sup>, 由于铝合金的浇注温度比钢铁的低得多, 液态产物的量远大于气态产物的量, 液态热解产物在充型过程中被排挤到金属与涂层的界面上,

表1 几种涂料的传输特性曲线参数及浇注的铝件孔隙率

Table 1 Transfer properties of several coatings and casting porosity

No.	Typical parameters of transfer curves		Porosity of casting/%
	$p_{max}/kPa$	$t/s$	
1	0.29	29.1	2.42
2	0.34	40.2	1.56
3	0.41	48.3	0.62
4	0.44	59.0	0.57
5	0.51	64.6	0.53

在金属液的热作用下继续排出或裂解成气态产物, 这些气态、液态热解产物对铸件的质量有较大的影响。由于涂层对裂解产物的传输有一定的控制作用, 故涂层的传输特性对铝件的质量必然有影响。

涂料压力变化曲线的峰值越大, 传输时间越长, 说明涂层排出热解气体的能力低, 裂解产物不能及时排出, 涂壳内的气体压力上升, 用这种涂料进行生产, 会由于型腔内气压高, 而阻碍铝液的充型, 降低铝液的充型速度, 即铝液充型平稳, 趋向于层流流动, 吸气减少, 有利于减少铝件的针孔。

#### 5 自制涂料与国内外涂料传输行为的比较

表2所示为自制的 HW-1 涂料与国内外涂料传输特性参数的比较, 涂层厚度均控制在 0.3mm 左右。其中 Ashland 是美国 Ashland 公司涂料, F1 为国内某厂商品涂料, F2 为国内某研究所涂料。从该表可以看出, HW-1 与 Ashland 涂料的传输曲线峰值大, 传输时间较长, F1, F2 涂料则正好相反。浇注试验结果表明, HW-1 与 Ashland 涂料浇注的铝件针孔度为一级, 而 F1, F2 涂料浇注的铝件针孔度在四级以上。上述实验结果证实了涂料的传输行为对铝件的针孔的确有很大的影响。

表2 HW-1 涂料与其它涂料的比较

Table 2 Comparison between HW-1 and other coatings

Coating	$p_{max}/kPa$	$t/s$	Rate of porosity
HW-1	0.412	48.3	1
Ashland	0.489	53.6	1
F1	0.173	23.4	4
F2	0.156	19.2	5

#### 6 结论

1) 珠光粉、云母粉加入量及涂层厚度增加, 传输曲线峰值增加, 传输时间延长。研究表明, 随着温度升高, 传输时间缩短。

2) 涂层高温透气率增加, 压力变化曲线的峰值降低, 裂解产物的排出时间减少。这说明随着涂层高温透气率的增大, 涂层排出热解产物的能力增加。

3) 热解产物通过涂层传输的压力峰值越高, 传输时间越长, 则铝铸件的孔隙率越低。比较了自

研的 HW-1 涂料与国内外涂料的传输行为, 结果表明 HW-1 涂料的传输性能可与美国 Ashland 涂料相媲美。

### [ REFERENCES ]

- [ 1 ] WU Guo-hua, LUO Ji-rong, XIE Min. Porosity of aluminum alloy in lost foam casting process [ J ]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2000, 10(5): 645- 649.
- [ 2 ] WEI Zur-jie, AN Ge-ying. 3-D simulation of fluid flow in lost foam process [ J ]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 1998, 8(3): 417- 420.
- [ 3 ] Warner M H, Miller B A. Pattern pyrolysis defect reduction in lost foam castings [ J ]. *AFS Transactions*, 1998, 161: 777- 785.
- [ 4 ] 吴国华. 消失模铸造铝合金针孔研究 [ D ]. 武汉: 华中理工大学, 2000.  
WU Guo-hua. Study on Aluminum Alloy Pinhole of Lost Foam Casting [ D ]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2000.
- [ 5 ] Kumar P, Gaidhar J L. Effect of process variables on surface finish and soundness of Al-11% Si alloy V-process castings [ J ]. *AFS Transactions*, 1996, 159: 1143 - 1150.
- [ 6 ] 吴国华, 罗吉荣. 工艺因素对干砂消失模铝铸件针孔影响的研究 [ J ]. *铸造*, 2000(3): 134- 137.  
WU Guo-hua, LUO Ji-rong. Study on the effects of processing parameters on the pinhole of Al casting in LFC process [ J ]. *Foundry*, 2000(3): 134- 137.
- [ 7 ] 吴国华, 罗吉荣. 铝合金干砂消失模铸造针孔研究 [ J ]. *铸造*, 1999(6): 7- 10.  
WU Guo-hua, LUO Ji-rong. Study on the pinhole of Al alloy in EPC process [ J ]. *Foundry*, 1999(6): 7- 10.
- [ 8 ] Fu J, Tsai H L. Transport of foam decomposition products into the sand in the lost foam casting process [ J ]. *AFS Transactions*, 1996, 91: 263- 270.
- [ 9 ] Liu J, Ramsay C W. A study of foam-metal coating interaction in the LFC process [ J ]. *AFS Transactions*, 1997, 137: 419- 425.
- [ 10 ] 孙万良. 消失模铸钢铸铁涂料研究 [ D ]. 武汉: 华中理工大学, 1999.  
SUN Wan-liang. Study on Lost Foam Coatings for Steel and Iron [ D ]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 1999.
- [ 11 ] 杨军生. 干砂消失模铸造铝合金充型特性研究 [ D ]. 北京: 清华大学, 1995.  
YANG Jun-sheng. Study on Properties of Aluminum Alloy Filling Mold in Lost Foam Casting [ D ]. Beijing: Tsinghua University, 1995.
- [ 12 ] 杨家宽. 消失模裂解特性及其废气净化的研究 [ D ]. 武汉: 华中理工大学, 1999.  
YANG Jia-kuan. Study on Properties of Pattern Degradation and Waste Gas Purification in Lost Foam Casting [ D ]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 1999.

## Effect of coating on porosity of aluminum alloy casting in lost foam process

WU Guo-hua<sup>1</sup>, LIU Zhi-li<sup>1</sup>, LIU Ma-ping<sup>1</sup>, DING Wen-jiang<sup>1</sup>, LUO Ji-rong<sup>2</sup>  
(1. State Key Laboratory of Metal Matrix Composite, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;  
2. School of Materials, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**[ Abstract ]** The effects of coating constituent, coating layer thickness, permeability and temperature on transfer behaviors of decomposition products through coating layer were studied with HST-2 instrument of high temperature permeability for lost foam coating. The results show that the peak values and transfer time increase with the increase of Zhuguang powder and mica content, coating thickness and with the decrease of permeability. The relationship between casting porosity and transfer behavior of decomposition products was researched. It is pointed out that high peak value and long transfer time are helpful for decreasing the porosity of castings. When the peak value and transfer time are more than 0.412 kPa and 48.3 s, the rating of porosity of aluminum casting can reach grade 1. The results show that the transfer properties of self-developed HW-1 coating are as good as those of Ashland coating in American.

**[ Key words ]** aluminum alloy; lost foam casting; decomposition products; transfer property

(编辑 龙怀中)