

灰铸铁 / 膨润土型砂润湿性的研究

杨 阳, 蒋 涛, 方柯楠, 朱世根

(东华大学机械工程学院, 上海 201620)

摘要: 金属液与造型材料的润湿性, 对铸件表面缺陷的形成有着重要影响。通过座滴法, 测定了1 400 °C下HT250与不同膨润土砂的接触角。试验探究了保温时间、膨润土加入量、添加剂种类、原砂种类等多个因素对接触角的影响。结果表明, 膨润土含量的增加及其他能使低熔物增多的添加剂的加入, 会减小接触角; 而煤粉和少量高熔点添加剂的加入, 对接触角影响不大; 采用耐火度为1 800 °C的球形陶瓷砂作原砂制成膨润土砂时, 型砂与铁液接触角相较于硅砂有所增大。分析认为, 接触角的变化与型砂中低熔物含量有关: 型砂表面属于不润湿的粗糙表面, 根据Cassie模型, 型砂间低熔物增多, 固液间实际接触面积增大, 粘附力增强, 接触角减小; 反之, 接触角增大。

关键词: 润湿性; 膨润土湿型砂; 固液界面接触角; 低熔物; 硅砂; 球形陶瓷砂

在金属液/型砂界面发生的物理和化学过程, 决定了铸件表面的质量。由固液界面间的相互作用引起的铸件缺陷, 尤其是粘砂缺陷, 导致铸件难以抛丸清理乃至报废, 浪费很多的能源、资源与时间。所以, 粘砂是铸造行业需要解决的主要缺陷问题之一。铸件粘砂可以分为机械粘砂和化学粘砂两种形式, 机械粘砂为化学粘砂的产生创造了一定的条件, 而化学粘砂常常又促使机械粘砂加剧, 它们经常互相作用、互相促进。其中, 机械粘砂的形成, 与金属液/型砂的润湿性直接相关。

膨润土湿型砂是铸铁件生产中最常用的型砂, 当前铸造厂使用的膨润土湿型砂, 普遍采用加入煤粉的措施防粘砂, 而煤粉的加入不仅恶化了工人的劳动条件, 且造成环境污染。因此, 近年来国内外不少的研究者致力于开发少污染甚至无污染的无煤粉造型材料。本研究拟从灰铸铁与膨润土型砂着手, 通过测定灰铸铁与不同成分的膨润土砂的接触角, 旨在更清楚地了解灰铸铁与膨润土型砂的润湿性和润湿机理, 同时希望能为开发替代煤粉砂的绿色型砂提供一些理论支持。

1 接触角测定

1.1 试验用材料及设备

试验材料: HT250试棒, 硅砂、球形陶瓷砂(均为50/100号, 其理化性质和粒度分布见表1和表2), 钠基膨润土(理化性质见表3), 添加剂若干。

表1 原砂理化指标

Tab. 1 Physical and chemical properties of base sand

类型	SiO ₂ /%	Al ₂ O ₃ /%	角形因数/%	含水量/%	耐火度/°C
硅砂	≥92	≤4.5	<1.25	≤0.5	>1 450
球形陶瓷砂	≥75	8~12	<1.1	≤0.1	>1 790

试验设备: SHN碾轮式混砂机、SAC锤击式制样机、CJY-II烧结点试验仪、SGH红外线烘干仪和电子天平等。

作者简介:

杨 阳(1997-), 男, 硕士, 主要研究方向为造型材料与铸造工艺。E-mail: 778682577@qq.com

通信作者:

朱世根, 男, 博士生导师。电话: 021-67792813, E-mail: sgzhu@dhu.edu.cn

中图分类号: TG221;
TG21⁺4

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)03-0316-07

收稿日期:

2023-02-22 收到初稿,
2024-04-25 收到修订稿。

表2 原砂粒度分布
Tab. 2 Particle size distribution of base sand

类型	粒度组成/%					
	40号	50号	70号	100号	140号	200号
硅砂	5.5	26.8	40.2	22.1	5.1	0.2
球形陶瓷砂	2.7	14.1	22.4	58.2	2.4	0.1

表3 膨润土理化指标
Tab. 3 Physical and chemical indicators of bentonite

粒度 /号	含水 量/%	湿压 强度/kPa	热湿拉 强度/kPa	吸蓝量 / (g·100 g ⁻¹)	膨润 值
200	≤12	≥120	≥3.7	≥33	96

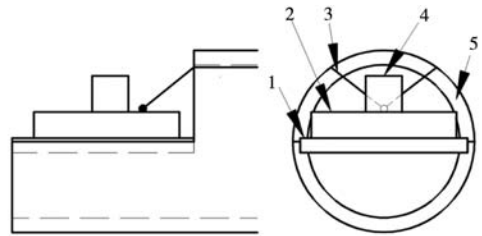
1.2 试验方法

(1) 混砂。无添加剂：原砂加入适量水混碾 1 min，再加入膨润土混碾 7 min。有添加剂：原砂加入适量水混碾 1 min，加入膨润土混碾 4 min，再加入添加剂混碾 3 min。

(2) 试样制备。取 5 g 混制好的型砂，用锤击制样机制成 $\Phi 30\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的砂饼，再将砂饼切割为约 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的扁平砂块试样，放入红外线烘干仪中、在 $130\text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干 10 min。

将 HT250 试棒用线切割切成边长为 5 mm 的小立方体试样，再将小立方体铁块试样依次用 240 目、400 目的砂纸打磨去除氧化皮，再用无水乙醇清洗掉油脂，烘干后备用。

(3) 接触角测定。使用座滴法测定铁液与造型材料的接触角，测定设备是由 CJY-II 烧结点试验仪改进而成的，如图 1 和图 2 所示。将小立方体铁块试样放在



1. 刚玉垫片 2. 砂块试样 3. 热电偶 4. 小铁块 5. 刚玉管

图2 试样区域放大示意图

Fig. 2 Schematic diagram of enlargement of the sample area

扁平砂块试样上，砂块试样放在刚玉垫片上，推入炉膛，通入保护气（氩气），开启烧结点试验仪，加热到 $1\ 400\text{ }^\circ\text{C}$ ，保温并拍照。试验全程在氩气的保护下进行。将试验照片用 ImageJ 软件进行接触角拟合，取三次结果的平均值，得到接触角数值，示意图如图 3 所示。

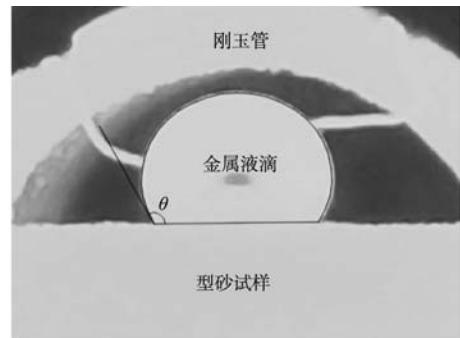
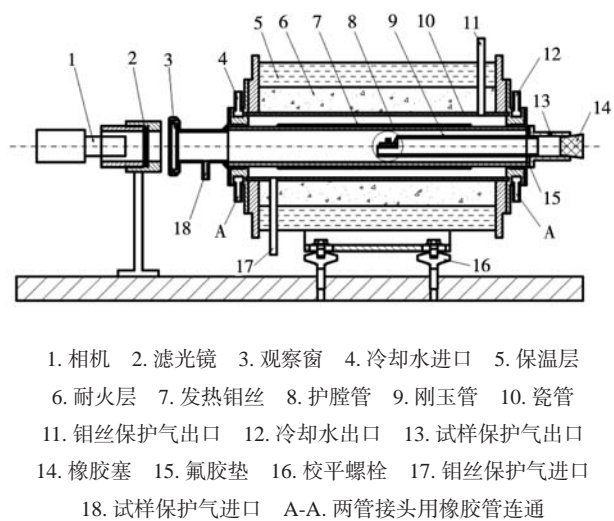


图3 接触角拟合示意图

Fig. 3 Schematic diagram of contact angle fitting

1.3 试验结果

试验测定了接触角随时间的变化。在氩气气氛下，当炉温达到 $1\ 400\text{ }^\circ\text{C}$ 时开始计时，保温 30 min，试验结果如图 4 所示。试验还测定了硅砂与 8% 膨润土混制



1. 相机 2. 滤光镜 3. 观察窗 4. 冷却水进口 5. 保温层
6. 耐火层 7. 发热钼丝 8. 护膛管 9. 刚玉管 10. 瓷管
11. 钼丝保护气出口 12. 冷却水出口 13. 试样保护气出口
14. 橡胶塞 15. 氟胶垫 16. 校平螺栓 17. 钼丝保护气进口
18. 试样保护气进口 A-A. 两管接头用橡胶管连通

图1 润湿性试验仪示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wettability test apparatus

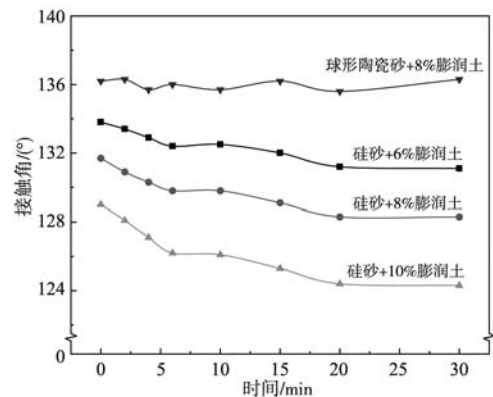


图4 灰铸铁与膨润土砂的接触角随时间的变化

Fig. 4 Changes in contact angle between gray iron and clay sand over time

成的型砂加入不同添加剂情况下的接触角，数据全部为保温6 min时的接触角数值，结果如图5所示。

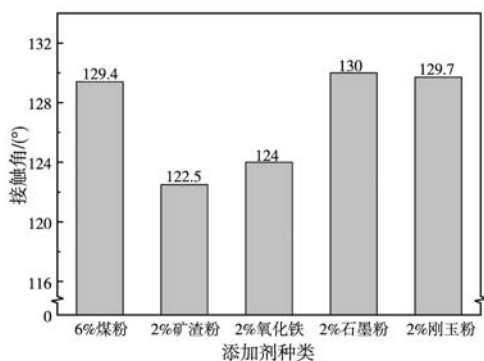


图5 几种不同添加剂情况下的接触角

Fig. 5 Contact angles under various additive conditions

由图4可知，对于硅砂作原砂配制成的膨润土型砂，在氩气气氛下、保温30 min内，灰铸铁与其的接触角始终在124°以上，灰铸铁对其不润湿；膨润土的含量对润湿性有一定影响，接触角随膨润土含量增加而略有减小；且随时间推移，接触角有减小的趋势：0~6 min时，接触角有所减小，6~10 min基本不变，10~20 min又略有减小，20~30 min基本不变。将原砂由硅砂换成球形陶瓷砂，接触角有所增大，且接触角没有随时间推移而减小，一直维持在136°左右。由图5可知，在膨润土含量一定的情况下，加入煤粉、少量石墨粉和刚玉粉，对接触角影响不大；但加入矿渣粉、氧化铁时，接触角减小。

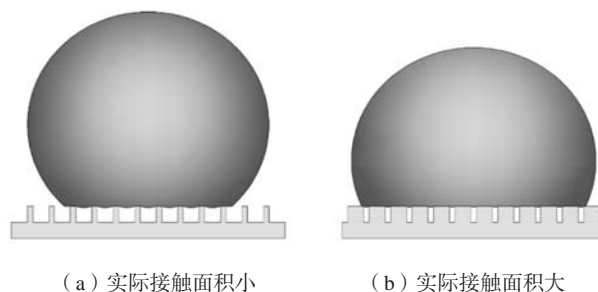
2 试验结果分析

为了探究受热后型砂的变化，分析型砂变化对润湿性的影响，将型砂加热到1 400 °C并冷却至室温，用超景深显微镜分别观察未加热和加热后型砂的形貌，放大倍数为150倍。

2.1 润湿机理分析

在不发生溶解、反应的情况下，液体表面能大于固体时，液体通常难以润湿固体表面，因为液体更倾向于保持自身的表面能量。铁液有着很大的表面能，1 400 °C时铁液的表面能 $>1\ 800\ \text{mJ/m}^2$ 。固体的表面能测定存在一定困难，不同文献报道的数据分散性较大，但1 400 °C时 SiO_2 和 Al_2O_3 的表面能都在 $1\ 000\ \text{mJ/m}^2$ 以下^[1]，相对于铁液来说属于“低能表面”。所以铁液对硅砂、球形陶瓷砂均不润湿。在氩气气氛保护下，金属液与原砂、熔融硅酸盐不反应，故金属液/膨润土砂体系润湿类型为非反应润湿。

型砂表面属于不润湿的粗糙表面，更符合Cassie-Baxter模型^[2]。Cassie模型认为，液滴与粗糙表面之间是一种固、气、液复合接触状态，在较不润湿的界面上，液体难以浸润粗糙表面上的“谷”，只与粗糙表面的“峰”接触，气体仍存在于“谷”的内部，形成微观液/气界面，如图6所示。在这种情况下，“峰”的面积越大，固液界面的实际接触面积就越大，粘附力越大，润湿性就越好；且粗糙度越小，润湿性也越好^[3]。



(a) 实际接触面积小

(b) 实际接触面积大

图6 Cassie-Baxter模型

Fig. 6 Cassie-Baxter model

2.2 保温时间与膨润土含量的影响

由图7可知，加热后硅砂混制成的膨润土砂已出现了烧结情况，砂粒变圆钝，部分砂粒粘在一起，砂粒表面被一层低熔物包裹，部分砂粒间的孔隙被低熔物填充。硅砂的主要成分是石英，其次是长石及云母，还有少量杂质，石英的熔点在1 713 °C，长石与云母的熔点较低（ $<1\ 270\ \text{°C}$ ）。膨润土主要成分是层状铝硅酸盐，试验用膨润土熔点在1 100~1 200 °C。长石、云母与膨润土高温时会熔化，成为包裹在石英颗粒表面的低熔物。

由图8可知，随膨润土含量的增加，型砂颗粒间的低熔物增多。膨润土相对于硅砂来说既是低熔物，又是细颗粒，从烧结动力学角度来分析，细颗粒之间的接触面积大，传热速度快，熔化后在颗粒之间形成液态连接，使得烧结温度降低，烧结速率进一步加快。膨润土的增多不仅增加了低熔物的数量，还加快了低熔物出现的速度。

所以，随保温时间延长、膨润土含量增加导致的接触角减小，是由低熔物增多引起的，示意图如图9所示。低熔物包裹在砂粒表面，增大了固液界面间的实际接触面积，随着低熔物的增多，渐渐填满砂粒之间的孔隙，使得表面粗糙度减小，固液间实际接触面积进一步增大。根据Cassie模型，这会使粘附力增大，接触角减小。

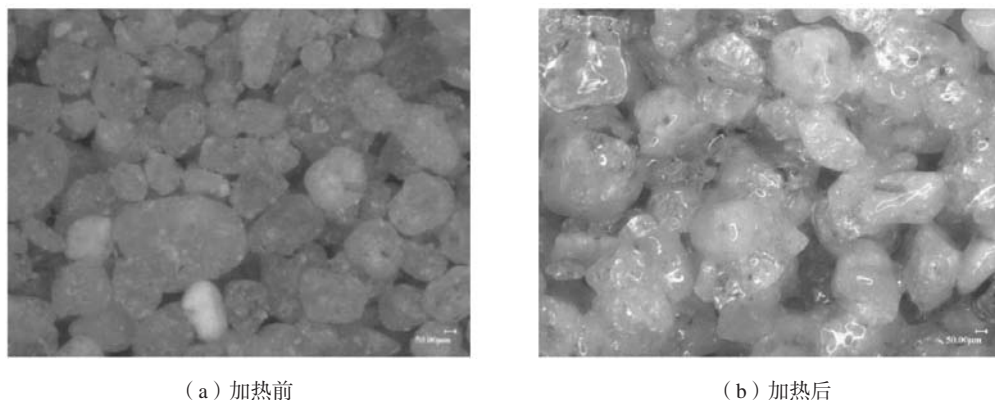


图7 硅砂+8%膨润土
Fig. 7 Silica sand with 8% bentonite

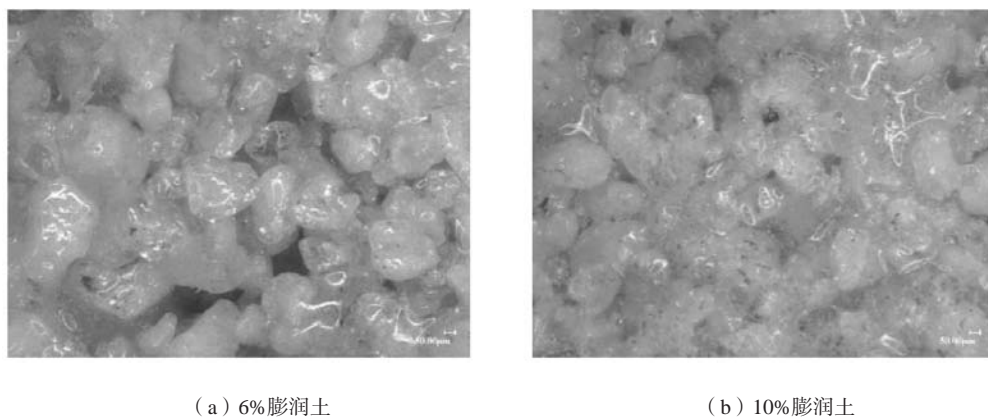
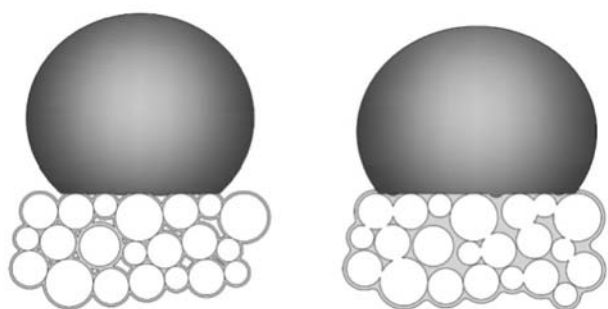


图8 不同膨润土含量型砂加热后形貌对比
Fig. 8 Comparison of morphologies of molding sands with different bentonite contents after heating



(a) 低熔物较少 (b) 低熔物较多

图9 低熔物对接触角影响示意图

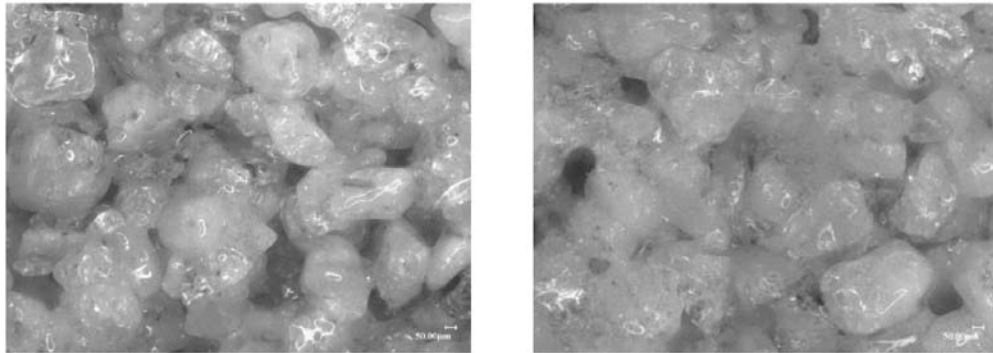
Fig. 9 Effect of low melting material on contact angle

2.3 添加剂的影响

(1) 煤粉的影响。加入煤粉后，接触角的改变并不明显。分析认为，这可能是接触角测试试验与实际铸造过程存在较大差异导致的。首先，煤粉受热时析出碳氢化物挥发成分，在高温作用下裂解出自由碳，在砂粒表面上沉积成一薄层碳膜，称为光亮碳。光亮

碳使金属与型砂难以进行反应，而且也使型砂不易被液体金属所润湿^[4-5]。在实际铸造过程中，铸件完全被铸型包裹，使得大部分自由碳都可以沉积在固液界面形成光亮碳，但接触角测试试验中只有较小的固液接触面积，大部分型砂都是暴露在环境中的，碳氢化物大部分挥发到环境中，固液界面的光亮碳数量很少，对接触角的影响也不明显。其次，试样本身处于惰性气氛下，煤粉产生的还原性气体对润湿性几乎没有影响。最后，煤粉受热后产生胶体，其膨胀可部分堵塞砂粒间的孔隙，但根据Cassie模型，砂粒间孔隙被填满，表面的粗糙度减小，实际固液接触面积增大，反而会使接触角略微减小。综合以上原因，煤粉在润湿试验中对接触角的影响不大。

(2) 矿渣粉的影响。由图10可知，相较不加入矿渣粉的试样，加入矿渣粉使型砂烧结加剧，低熔物增多，填充在试样表层砂粒间的孔隙中，使得试样表面光滑且致密。矿渣粉的主要成分是钙、镁的氧化物、硅酸盐及铝酸盐，还含有少量铁的氧化物等杂质。硅酸盐、铝酸盐熔融温度低于浇注温度，



(a) 未加矿渣粉

(b) 加入矿渣粉

图10 加入矿渣粉与未加矿渣粉型砂加热后形貌对比

Fig. 10 Comparison of morphologies of heated molding sands with and without addition of slag powder

氧化物加热时还会与石英反应生成硅酸盐，反应温度低于1 200 ℃，所以矿渣粉的加入使低熔物进一步增多。矿渣粉与膨润土作用机理类似，在加热后使型砂低熔物更多，固液间粘附力更强，接触角也进一步降低。

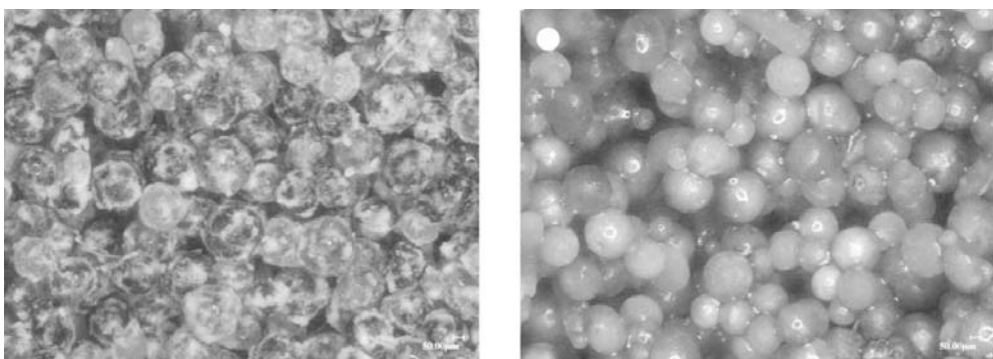
(3) 氧化铁的影响。加入氧化铁粉后， Fe_2O_3 不仅会与其他氧化物产生低熔化合物，如 $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ （熔点1 205 ℃）、 $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ （熔点1 140 ℃），且会与铁液反应生成FeO，FeO可以润湿硅砂，并与 SiO_2 反应生成铁橄榄石，产生反应润湿，润湿驱动力增强，二者都会导致接触角减小。在润湿试验过程中，低熔物的生成温度是低于金属熔化温度的，所以 Fe_2O_3 颗粒只有表层的少部分参与了反应，大部分被低熔物包裹或者参与了化合，故对接触角的影响并不如矿渣粉明显；而实际浇注过程中，低熔物的

形成需要一定时间，FeO的生成速度更快，所以实际浇注过程中氧化铁粉的加入会使铁液渗入加深，加剧化学粘砂。

(4) 石墨粉、刚玉粉的影响。石墨粉（熔点>3 000 ℃）、刚玉粉（熔点>2 000 ℃）是高耐火度添加剂，少量加入型砂后，作为分布在砂粒间的高耐火质点，与原砂一起被低熔物包裹，对低熔物的析出没有过多影响，所以对接触角影响不大。

2.4 原砂的影响

由图11可知，球形陶瓷砂未烧结，颗粒分明、边界清晰。球形陶瓷砂主要成分为 Al_2O_3 （>75%）、 SiO_2 ，杂质少，耐火度大于1 800 ℃，原砂不发生烧结^[6]，配制成的膨润土砂加热后仅有少量低熔物包裹在砂粒表面，低熔物几乎全部来自熔化的膨润土。



(a) 加热前

(b) 加热后

图11 球形陶瓷砂+8%膨润土

Fig. 11 Spherical ceramic sand with 8% bentonite

球形陶瓷砂比硅砂颗粒更圆整，与铁液接触的“峰”更小；杂质少，化学性质稳定，加热后砂粒无变化，仅有少量低熔物包裹在砂粒表面，实际固液接

触面积小，固液界面粘附力小。型砂中微量的 Fe_2O_3 杂质和浇注时空气中的氧元素会与铁液反应生成FeO，而球形陶瓷砂的主要成分是 Al_2O_3 ，只有少量 SiO_2 ，与

FeO反应轻微,所以相较于硅砂,球形陶瓷砂反应润湿的倾向更小。故球形陶瓷砂配制成的膨润土砂对灰铸铁液有更高的接触角,且接触角不随时间推移而减小。

2.5 现实意义

因为铸铁成分中碳当量较高,可以阻碍铁液氧化,通常情况下,在铸铁件生产中以机械粘砂为主。铸件不产生机械粘砂的条件,必须是金属液的静压力不大于金属液开始渗入砂粒空隙的临界渗入压力,即 $P_{\text{静}} \leq P_{\text{临}}$ 。临界渗入压力的计算公式为:

$$P_{\text{临}} = P_{\text{气}} - P_{\text{毛细}} = P_{\text{气}} - \frac{2\sigma\cos\theta}{r}$$

式中: $P_{\text{气}}$ 为浇注后铸型中产生的气体对金属液的反压力, N; $P_{\text{毛细}}$ 为金属液在砂型孔隙中产生的毛细压力, N; σ 为液态金属的表面张力系数, N/m; θ 为金属液与造型材料的接触角, ($^{\circ}$); r 为毛细管半径, m。

由上式可知,在金属液不润湿铸型的情况下, $\cos\theta$ 为负值,毛细压力阻碍金属液渗入铸型,更高的接触角可以保证更大的毛细压力,使机械渗透趋势下降。

薄壁铸件的铸造过程中,铁液接触到铸型后温度急剧下降,表层很快就凝固,热作用、化学作用时间短,型砂产生的低熔物数量较少,可以与保温时间较短时测得的接触角相对应,接触角会较大。但厚壁铸件的铸造过程中,金属保持液态的时间长,铸型型腔界面处低熔物数量增多,可以与保温时间较

长时测得的接触角相对应,接触角会减小。因此,厚壁铸件生产时,在铸型强度满足要求的情况下,应该尽量减小膨润土的使用量,或换用高耐火度、杂质较少的型砂。当然,加入适量低熔点添加剂,堵塞砂粒间孔隙防止铁液渗透,也不失为一种防止粘砂的好方法。

实际铸造生产中,铁液和型砂没有受到氩气保护,情形更加复杂,空气中的氧气和水蒸气对铁液和型砂的反应会产生不可忽视的影响,实际接触角与本试验测得的接触角存在一定差别。所以,本研究对接触角的测定与分析,对于实际生产而言只能作定性参考。

3 结论

(1) 在氩气气氛中,灰铸铁对硅砂配制成的膨润土砂不润湿,但热作用时间延长,会加剧型砂烧结,低熔物增多,接触角降低。

(2) 型砂中若含有高温时使低熔物增加的组分,以及这些组分含量的增加,则会增大固液界面的实际接触面积,增大粘附力,减小接触角;而加入煤粉和少量高熔点物质,对接触小影响不大。

(3) 球形陶瓷砂因其具有高耐火度和较少的杂质含量,未出现因烧结导致的低熔物增多的情况,不仅与铁液有着更高的接触角,也避免了因为热作用时间延长导致的接触角减小。

参考文献:

- [1] 罗晓斌,朱定一,乔卫,等.高表面能固体的润湿性实验及表面张力计算[J].材料科学与工程学报,2008,26(6):932-936.
- [2] CASSIE A B D, BAXTER S. Wettability of porous surfaces [J]. Transactions of the Faraday Society, 1944, 40: 546-551.
- [3] 朱亮,冯焱颖,叶雄鹰等.粗糙表面的可控润湿性研究[J].传感技术学报,2006(5):1709-1712.
- [4] 昆明工学院.造型材料[M].云南:云南人民出版社,1978.
- [5] 中国机械工程学会铸造分会.铸造手册:造型材料[M].4版.北京:机械工业出版社,2020.
- [6] 李忠泽,刘满对,王柏勤,等.常见铸造人工砂的性能和应用综述[C]//中国铸造协会.第十四届中国铸造协会年会论文集,2018:7.
- [7] ENSIKAT H J, DITSCHKE-KURU P, NEINHUIS C, et al. Superhydrophobicity in perfection: the outstanding properties of the lotus leaf [J]. Beilstein Journal of Nanotechnology, 2011, 2(1): 152-161.
- [8] LEWANDOWSKI J L, HOLTZER M. An investigation of wettability and work of adhesion in ferrous alloy/moulding sand systems [J]. Cast Metals, 1995, 8(3): 159-165.
- [9] OGINO K, NOGI K, KOSHIDA Y. Effect of oxygen on the wettability of solid oxide with molten iron [J]. Tetsu-to-Hagané, 1973, 59(10): 1380-1387.

- [10] STEFANESCU D M. The effect of mould/metal interface phenomena on the surface quality of castings [C]//10th Asian Foundry Congress (AFC10), Nagoya, Japan. 2008: 21-24.
- [11] 张猛, 朱世根, 骆祎岚, 等. 无机粘结剂型砂的烧结特性研究 [J]. 材料科学与工艺, 2014, 22 (3): 119-123.
- [12] 魏旭. 环保砂铸造工艺性能的基础研究 [D]. 上海: 东华大学, 2017.

Study on the Wettability of Gray Cast Iron/Bentonite Molding Sand

YANG Yang, JIANG Tao, FANG Ke-nan, ZHU Shi-gen
(School of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract:

The wettability between molten metal and molding materials significantly influences the formation of surface defects on castings. Utilizing the sessile drop method, contact angles of HT250 at 1 400 °C were measured with different bentonite sands. The experiment explored the effects of multiple factors such as insulation time, amount of bentonite added, type of additives, and type of raw sand on the contact angle. The results indicate that an increase in bentonite content and the addition of additives that increase the presence of low-melting-point substances lead to a decrease in the contact angle. Conversely, the addition of coal powder and small amounts of high-melting point additives has little effect on the contact angle. When using spherical ceramic sand with a refractoriness of 1 800 °C as the base sand to produce bentonite sand, the contact angle between the molding sand and molten iron increases compared to silica sand. The analysis suggests that the change in contact angle is related to the content of low-melting-point substances in the molding sand: the molding sand surface is characterized by a non-wetting rough surface. According to the Cassie model, an increase in low-melting-point substances between molding sands enlarges the actual contact area at the solid-liquid interface, enhances adhesion, and reduces the contact angle; conversely, the contact angle increases.

Key words:

wettability; bentonite green sand; solid-liquid interface contact angle; low-melting-point substances; silica sand; spherical ceramic sand
