DOI：10.3901/JME.2016.06.092

云溪环保型砂铸造性能的研究

朱世根[1,2] 陶李洋[1,2] 骆祎岚[1,2] 丁 浩[1,2]
（1. 东华大学机械工程学院 上海 201620；
2. 东华大学纺织装备教育部工程研究中心 上海 201620）

摘要：云溪环保型砂用于砂型铸造，能有效减少铸件的粘砂、夹砂、砂眼、气孔等缺陷，提高铸件的内在和外表质量；同时具备绿色环保、循环应用、优质高效的综合优势。通过系统的测试研究云溪环保型砂的湿压强度、透气性、热湿拉强度、发气性、高温热膨胀性能、高温热压强度，以及高温形态和示差扫描量热-热重分析(Differential scanning calorimetry-Thermogravimetric analysis, DSC-TG)曲线，并和传统的煤粉湿型砂进行对比，进一步认识云溪环保型砂的特点，进一步认识型砂性能对铸件缺陷和铸件质量的影响。研究表明，云溪环保型砂与煤粉湿型砂的湿压强度、透气性、高温热膨胀性能基本相似，而云溪环保型砂的热湿拉强度、高温热压强度、发气性等性能远远优于煤粉湿型砂，这些性能优势能有效减少铸件缺陷，保证铸件质量。研究工作对进一步提高铸件的品质和推行云溪环保型砂这一绿色环保铸造生产工艺具有基础性的指导作用。

关键词：环保型砂；绿色铸造；型砂性能；铸件缺陷
中图分类号：TG221

Study on the Performance of YunXi Environment Friendly Molding Sand

ZHU Shigen[1,2] TAO Liyang[1,2] LUO Yilan[1,2] DING Hao[1,2]
(1. College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620;
2. Engineering Research Center of Advanced Textile Machinery of the Ministry of Education,
Donghua University, Shanghai 201620)

Abstract: YunXi environment friendly molding sand has been successfully used in sand casting process, it can effectively reduce burning-on, scab, sand inclusion, blowhole and other defects. It helps to improve the internal quality and visual quality of casting. YunXi environment friendly molding sand casting process has comprehensive advantages of environment friendly, economic, high-quality and high-efficient. A series of experiments are carried out, which helps to further understand the characteristics of YunXi environment friendly molding sand and the effects of molding sand performance on the casting defects and casting quality. The wet compressive strength, permeability, hot wet tensile strength, gas evolution, thermal expansion, hot pressing strength, high temperature form transformation, differential scanning calorimetry-Thermogravimetric analysis(DSC-TG) curve of YunXi environment friendly molding sand are systematically studied, and which are compared with that of the conventional coal sand. The result shows that the wet compressive strength, permeability, thermal expansion of YunXi environment friendly molding sand are similar with coal sand, but the hot wet tensile strength, hot pressing strength, gas evolution of YunXi environment friendly molding sand are far superior to that of coal sand. These advantages can effectively reduce the casting defects, and ensure the quality of the casting. Research work can helps to further improve the casting quality and further promote the production process of green casting.

Key words: environment friendly molding sand; green casting; molding sand performance; casting defects

0 前言

铸造是工业的基础，汽车、石化、钢铁、电力、纺织、造船、装备制造、航空航天等支柱产业都离不开铸造[1]。在各种铸造方法中，砂型铸造极为重要，湿型砂作为砂型铸造中最重要的造型材料之一，它的适用范围最广，耗用量最大[2]。

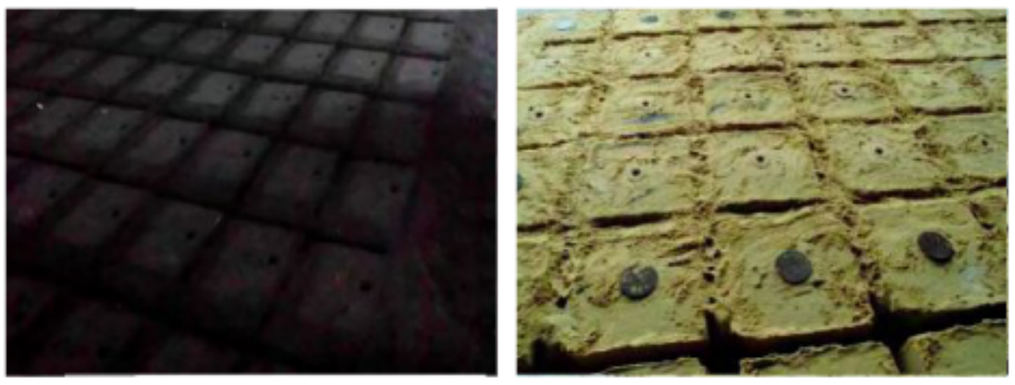
国内外广泛使用的煤粉粘土砂，具有材料成本低、防粘砂效果好、生产效率高的优点，但其消耗量大、排放严重、在铸造过程中煤粉燃烧分解产生有毒气体和致癌物质，造成污染环境，影响工人身体健康，不适应铸造工业科学发展的需要和当前降耗减排的环保政策[3]。

“绿色铸造”是未来一段时间内行业发展、结构调整的主线[4]，东华大学与企业合作，在这方面付诸行动，开发出了云溪环保型砂，它是全由无机

20150831 收到初稿，20151214 收到修改稿

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

材料组成的型砂，颜色是土黄色的，使用这种型砂进行铸造，车间干净，如图 1 所示，不会对环境产生污染，车间工人的身体健康可得到进一步保障。



(a) 煤粉湿型砂　　(b) 云溪环保型砂

图 1　铸造厂现场实况

用云溪环保型砂进行铸造，它会在铸型与铸件之间形成一层致密的烧结壳，它在高温时，能抵挡住液态金属的冲刷和渗透，并在金属凝固后，能牢固地粘附在铸件的表面；在室温时，它能轻易地从铸件表面去除，减少铸件的清砂工作量。云溪环保型砂的烧结壳，可以减缓铸件的冷却速度，保证铸件的机械加工性能，也有助于实现高温打箱，提高生产效率。使用这种型砂进行铸造，能有效减少铸件的粘砂、夹砂、砂眼、气孔缺陷，表面光洁，尺寸精度提高，铸件质量得到保证[5-8]；型砂可循环使用，废砂排放量少，排放出去的废砂与环境友好、对环境无污染，如图 2 所示。这种型砂已推广应用于实践生产，得到各企业的良好反馈。



图 2　云溪环保型砂铸造产品

通过综合地研究云溪环保型砂的性能，进一步认识该型砂的特点，认识该型砂性能对铸件缺陷和铸件质量的影响，有利于更好地推广应用云溪环保型砂这种资源节约型绿色造型材料、实现环境保护型铸造生产。

1　试验方案

1.1　试验材料及仪器

试验用材料：云溪环保型砂(A 号新砂，B 号新砂，两者配比不同)，煤粉砂。云溪环保型砂主要由石英砂，黄壤土(化学成分见表 1)和其他添加剂配制而成。B 号新砂粒度比 A 号新砂细小分散。

图 3a 所示为云溪环保型砂，图 3b 所示为传统的煤粉砂。

表 1　黄壤土的化学成分及质量分数　　%

组分	SiO_2	Al_2O_3	氧化铁	其他金属氧化物	损失量
质量分数	69.70	20.90	1.4	0.04	0.167



(a) 云溪环保型砂　　(b) 煤粉砂

图 3　试验用材料

试验用设备：SHN 型碾轮式混砂机，SAC 锤击制样机，SWX 数显式万能强度试验仪，STZ 直读式透气性测定仪，SLR 型型砂热湿拉强度试验仪，SGH 双盘红外线烘干器，SFL 记录式发气性试验仪，ZRPY 型热膨胀系数测定仪，SQW-A 材料高温强度试验仪，STA449F3 同步热分析仪，Axio_Scope_A1 热台偏光显微镜。

1.2　试验方法

1.2.1　湿压强度与透气性试验

云溪环保型砂按不同的比例配成 A 号新砂和 B 号新砂。煤粉砂是目前企业应用比较广泛的铸造型砂，取自浙江一铸造企业。分别取未加入水分的三种型砂各 1 kg，每次加入 1%的水分，在 SHN 型碾轮式混砂机混 5 min，取出型砂，用于试验。

用 SAC 锤击制样机制成ϕ50 mm×50 mm 的圆柱形试样，用 SWX 数显式万能强度试验仪测试型砂的湿压强度，用 STZ 直读式透气性测定仪测试型砂的透气性。对不同含水量时的湿压强度与透气性进行了测试。

1.2.2　热湿拉强度试验

把上述配制好的型砂用 SAC 锤击制样机制成ϕ50 mm×50 mm 的圆柱形试样，用 SLR 型型砂热湿拉强度试验仪测试型砂的热湿拉强度。对不同含水量时型砂的热湿拉强度进行了测试，试验参数如下：型砂加热温度 320 ℃，加热时间 20 s。

1.2.3　型砂发气性试验

用 SGH 双盘红外线烘干器烘干型砂，分别取三种烘干的型砂 1 g，用 SFL 型记录式发气性试验仪测试型砂的发气量，试验参数为：加热温度 850 ℃。

1.2.4　高温热膨胀性能试验

分别取三种型砂 12 g，制成ϕ8 mm×50 mm 的

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

试样，每个试样分别用 ZRPY 型热膨胀系数测定仪测试其热膨胀性能，试验参数：温度范围为常温到 1 300 ℃，加热速率为 10 K/min。

1.2.5 高温热压强度试验

分别取三种型砂 50～60 g，用 SAC 锤击式制样机制成ϕ30 mm×50 mm 的圆柱形试样，制备多个试样。用 SQW-A 材料高温强度仪测试型砂在不同温度下的抗压强度，温度范围为常温到 1 400 ℃，每隔 100 ℃做一次试验，待炉膛温度稳定后，放入试样保温 20 min，加载，得到抗压强度。

1.2.6 高温形态观察试验

取 A 号新砂 50 mg，使用 Axio_Scope_A1 热台偏光显微镜观察型砂的升温过程中的形态变化。试验参数：放大倍数 50 倍；温度先由常温升温到 1 400 ℃，然后从 1 400 ℃冷却至室温，每隔 100 ℃，记录一次。

1.2.7 DSC-TG 试验

取 A 号新砂 30 mg，用 STA449 同步热分析仪测试型砂示差扫描量热-热重分析(Differential scanning calorimetry-Thermogravimetric analysis, DSC-TG)曲线。试验参数如下：选取 N_2 作为试验的保护气体和吹扫气体，Al_2O_3 坩埚作为试验的坩埚，温度范围为常温到 1 400 ℃，加热速率为 10 K/min。

1.2.8 铸铁浇注试验

用 SHN 碾轮式混砂机混砂，第一组用含水量 4%的 A 号新砂，第二组用含水量 11%的 B 号新砂。在 SHN 型碾轮式混砂机中混 5 min，取出型砂造型，浇注。浇注的铸件为高 20 mm、半径 75 mm 的半圆柱体，材质为 HT150。浇注温度为 1 400 ℃。

2 试验结果及分析

2.1 湿压强度与透气性分析

由试验得到湿压强度与透气性随着水分增加而变化的曲线图，如图 4 所示。

(1) 由图 4 可知 A 号新砂在含水量为 4%时，湿压强度达到最高为 0.074 MPa，透气性达到最高为 170；B 号新砂在含水量为 11%时，湿压强度达到最高为 0.167 MPa，在含水量为 12%时，透气性达到最高为 55；煤粉砂在含水量为 5%时，湿压强度达到最高为 0.091 MPa，在含水量为 6%时，透气性达到最高为 200。型砂的最高湿压强度：B 号新砂>煤粉砂>A 号新砂；型砂透气性：煤粉砂>A 号新砂> B 号新砂。

(2) 由于配成的 B 号新砂的粒度均匀性较分散，小颗粒填充大颗粒间的空隙，增加了质点间接触面积，故三者中透气性最差，强度最高。A 号新砂的粒度均匀性比较好，且加入的粘土含量比较低，所以透气性达标，湿压强度偏低。但从 B 号新砂的湿压强度可以看出，通过调整云溪环保型砂的配比，可使湿压强度和透气性综合性能达到最适合。

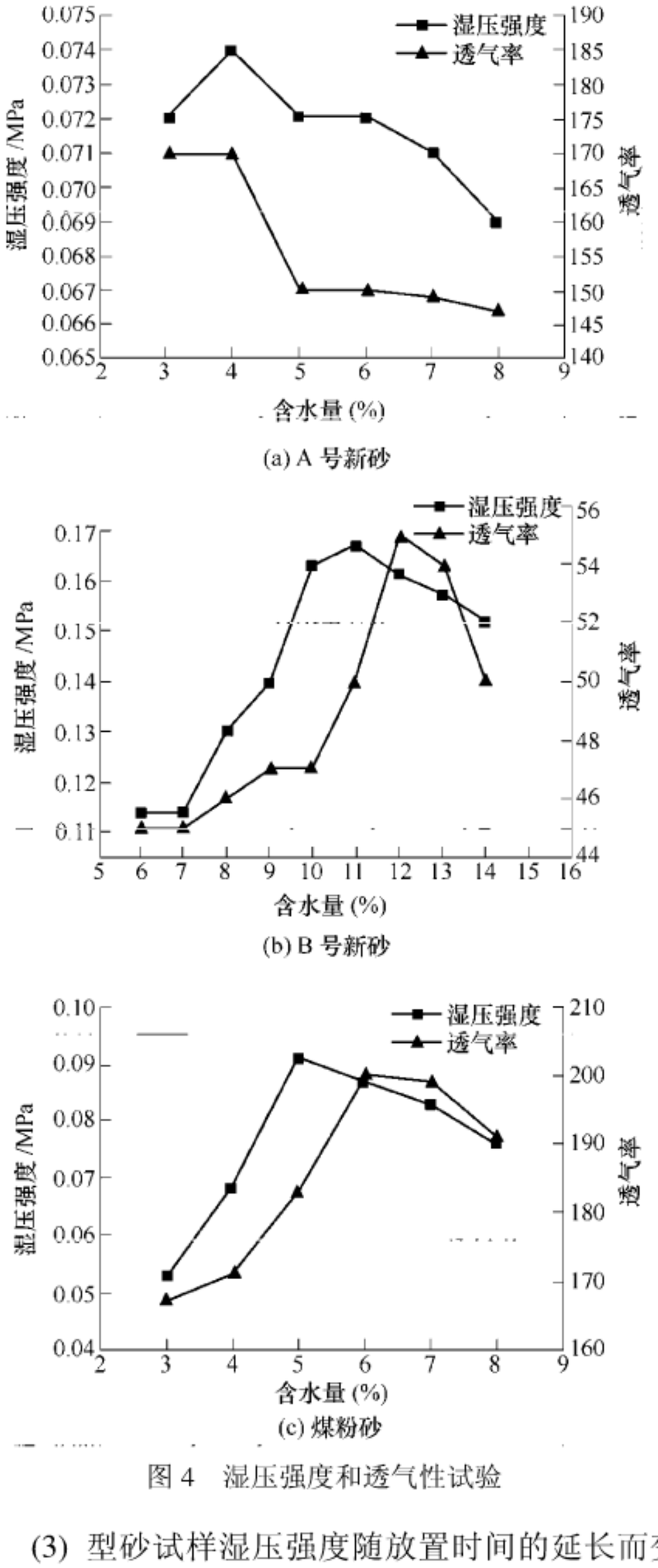


图 4 湿压强度和透气性试验

(3) 型砂试样湿压强度随放置时间的延长而变化的情况如表 2 所示。A 号新砂放置一定时间后湿压强度显著提高，比煤粉砂提高得多。放置 3 h 后，强度达到 0.117 MPa，放置 20 h 后，强度达到 0.291 MPa，之后强度趋于稳定。说明云溪环保型砂放置一段时间后，强度可得到较大幅度提高。

2.2 热湿拉强度分析

由试验得到热湿拉强度随着水分增加而变化的曲线，如图 5 所示。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2　型砂放置试验

放置时间/h	A 号新砂抗压强度/MPa	煤粉砂抗压强度/MPa
0	0.074	0.091
1	0.089	0.093
2	0.101	0.097
3	0.117	0.102
20	0.291	0.169
24	0.293	0.167

由图 5 可知 A 号新砂在含水量为 6%时，热湿拉强度达到最高为 4.4 kPa；B 号新砂在含水量为 11%时，热湿拉强度达到最高为 2.5 kPa；煤粉砂在含水量为 5%时，热湿拉强度达到最高为 2.1 kPa。

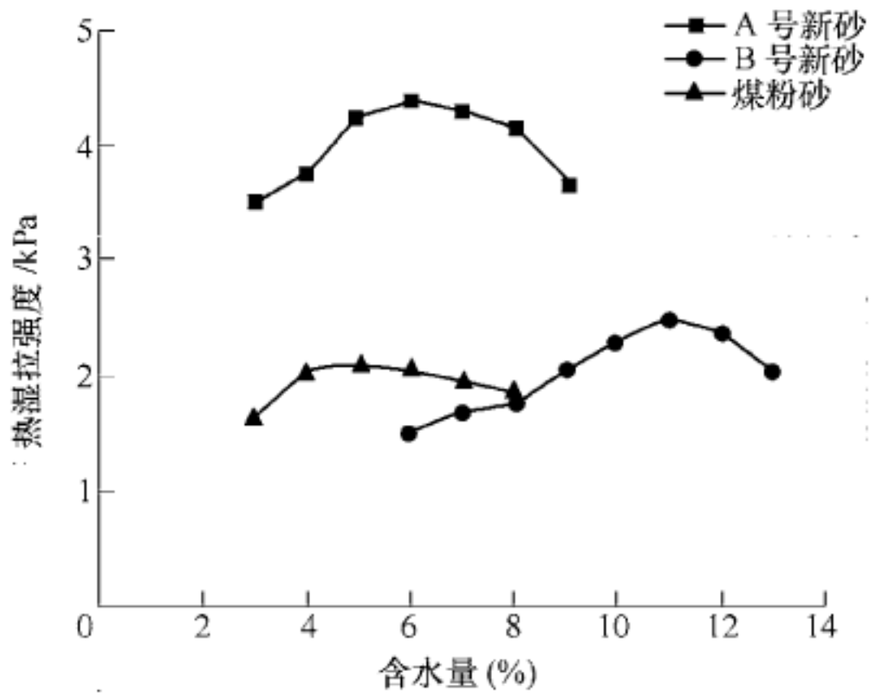


图 5　热湿拉强度试验

最高的热湿拉强度：A 号新砂>B 号新砂>煤粉砂；故在高温浇注过程中，云溪环保型砂的抗夹砂能力比煤粉砂要好得多。

2.3　发气性分析

A 号新砂发气量的平均值为 9.5 mL/g，B 号新砂发气量的平均值 8.9 mL/g，而煤粉砂的平均值为 38.2 mL/g，云溪环保型砂的发气量比煤粉砂的发气量要低得多。由此可以推断用云溪环保型砂生产铸件，产生气孔缺陷的可能性比煤粉砂要低得多。

煤粉砂中含有煤粉，在高温下会产生一氧化碳等有毒气体和致癌物，不仅对环境造成污染，还对人体的健康造成伤害。而云溪环保型砂的配方是由全无机材料构成的，在高温下产生的气体只有少量水汽，而水汽是无毒的、环保的。

2.4　高温热膨胀性能分析

热膨胀率指的是试样在受到加热情况下膨胀的长度占原始长度的比例，反映了试样在浇注情况下自身的变形情况。由试验得到热膨胀率随着温度上升而变化的曲线，如图 6 所示。

(1) 型砂的热膨胀率均随温度的升高而呈上升的趋势；热膨胀率主要受温度影响出现热胀的趋势。

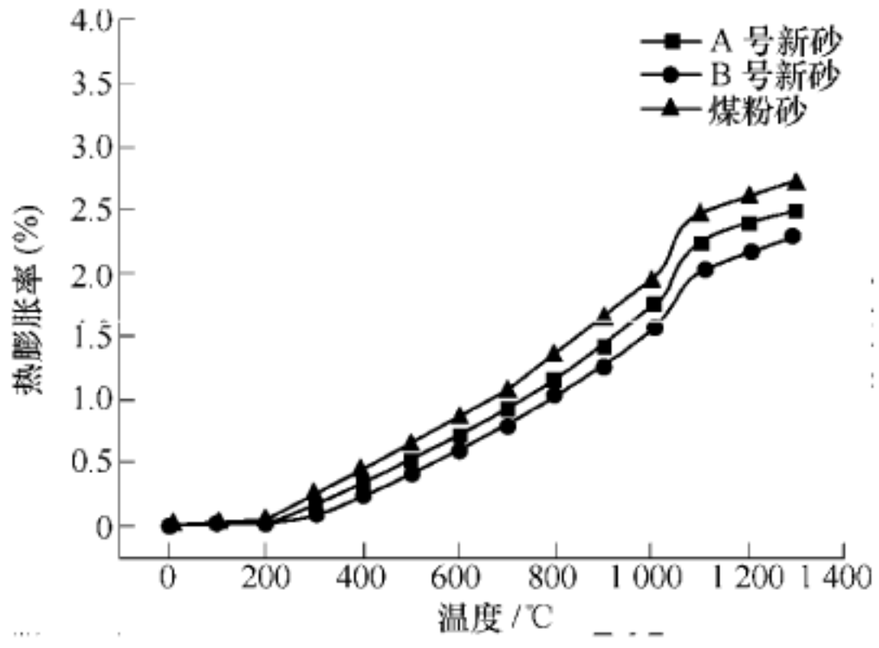


图 6　热膨胀性能试验

(2) 型砂升温过程中，在室温到 200 ℃，1 100～1 300 ℃曲线的斜率比在 200～1 100 ℃的要低。室温到 200 ℃由于水分和粘土类矿物对型砂的影响，水分蒸发，粘土类矿物失去水分，其周围的水化膜减薄，与砂粒间距变小，粒子间强烈的吸附结合，型砂有一个收缩的趋势，抵消了一部分热胀。在 1 100～1 300 ℃区间，温度-热膨胀率曲线的斜率变小，是因为在这个阶段，型砂马上要进入熔融烧结状态，型砂表面的低耐火度的物质已经开始熔融了，型砂逐渐连接靠拢，热膨胀率曲线的斜率减小。

(3) 热膨胀率：煤粉砂>A 号新砂>B 号新砂，云溪环保型砂的热膨胀率较低，在高温浇注过程中能有效防止铸件变形，减少夹砂缺陷。

2.5　高温热压强度分析

高温热压强度是指型砂在高温下保温一段时间之后测得的即时强度，反映了浇注后铸型表面层、近表面层的实际情况[9]。由试验得到热压强度随着温度上升而变化的曲线，如图 7 所示。

(1) 由图 7 可知，整个过程中，随着温度的上升，热压强度先上升后下降。A 号新砂在温度为 1 100 ℃时，热压强度达到最高为 8.17 MPa；B 号新砂在温度为 1 100 ℃时，热压强度达到最高为 4.88 MPa；煤粉砂在温度为 1 100 ℃时，热压强度最高为 2.39 MPa；最高的热压强度：A 号新砂>B 号新砂>煤粉砂。A 号新砂的高温强度远高于煤粉砂的高温强度。

(2) 温度上升，随着水分的蒸发，型砂中的粘土类矿物周围的水化膜减薄，粘土类矿物与砂粒间距变小，粒子间强烈的吸附结合，强度上升。然后，矿物逐渐分解，生成新相，质点更加细小，附着力增加，强度增加。1 100 ℃时型砂表面一些低耐火度的组分开始熔融，形成玻璃状的粘结膜，把砂粒表面粘连得更好，故其强度有显著的增加。在出现峰值以后，继续提高温度，型砂熔融软化，强度就

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

很快下降，塑性得到提高。

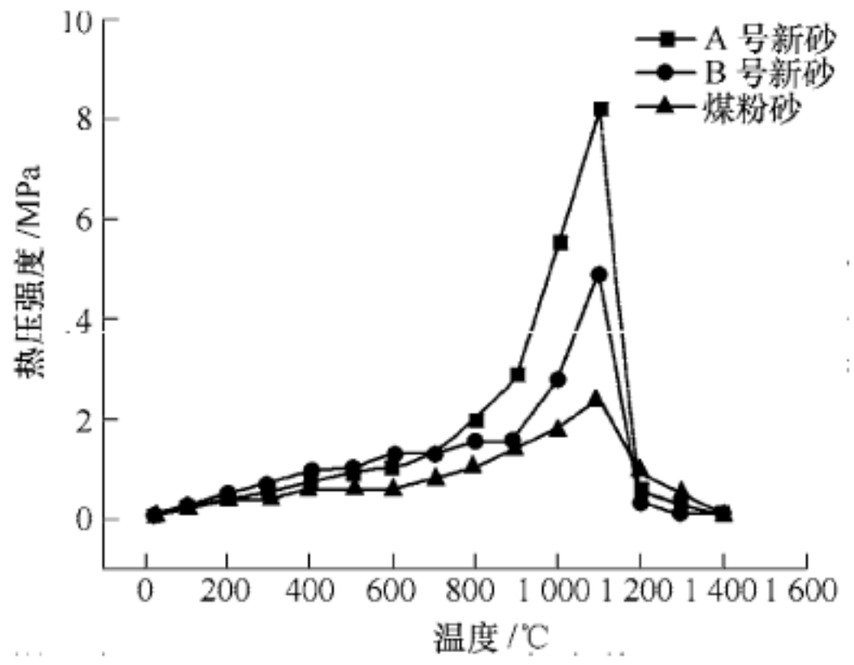


图 7 热压强度试验

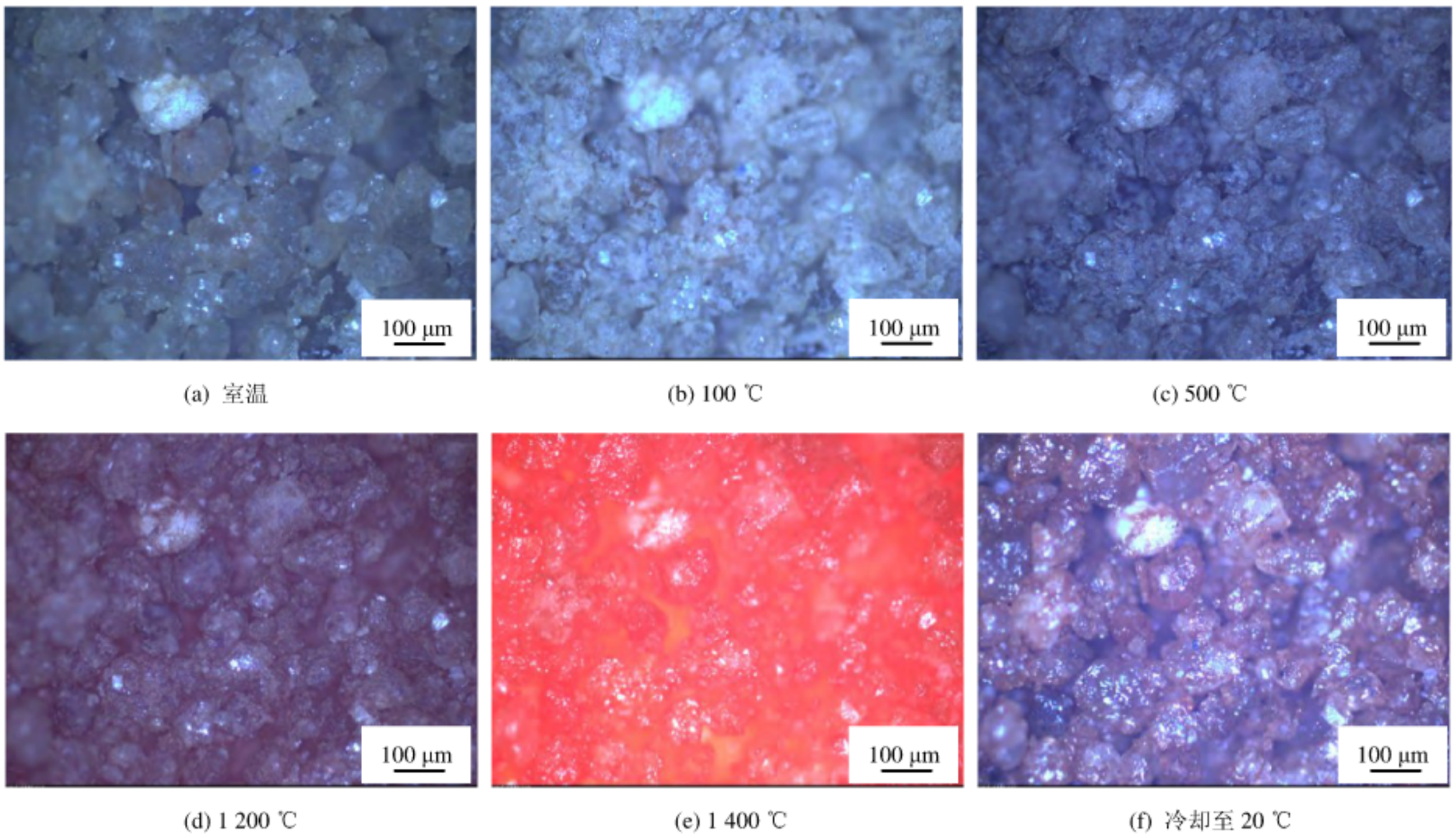
(3) 用云溪环保型砂造型、浇注，接触铁水的部分，温度急剧上升，达到 1 350～1 400 ℃，型腔内壁形成了高塑性层，再往外型砂温度 1 100 ℃左右的那层形成了高强度层。内壁的高塑性层有一定的退让性，可以缓冲铸件的热胀冷缩，防止铸件变形；高强度层又可以保证长时间的浇注不会影响铸件尺寸精度，不会产生砂眼缺陷。因此，使用云溪环保型砂可以浇注受热作用剧烈的铸件。

2.6 高温形态分析

由试验得到云溪环保型砂随温度上升而发生的形态变化，如图 8 所示。

整个试验过程，从室温升温到 1 400 ℃，再冷却至室温。100 ℃时砂子失去水分，粘土类矿物失去水分，变成白色的粉状附着在型砂表面。500 ℃左右的时候，型砂表面逐渐变暗，粘土类矿物开始发生分解，随着温度上升，粘土类矿物分解得越多，表面变得更加暗淡。1 100～1 200 ℃的时候，隐约可以看到型砂表面逐渐粘连在一起，型砂表面一些耐火度较低的组分开始熔融烧结，型砂之间连在一起，导致热压强度上升。1 400 ℃的时候，明显可以看到很多玻璃状的物质，部分的砂粒也发生了熔融，型砂的热压强度因此下降，塑性因此提高。再冷却到室温，可以看到，一部分的玻璃态保留了下来。

用云溪环保型砂高温浇注时，型腔表面层经过熔融、烧结、冷却后，像玻璃一样变成脆性，这在浇注试验中可以体现，表面形成脆性的烧结壳，轻轻一敲就剥落。



(a) 室温 (b) 100 ℃ (c) 500 ℃

(d) 1 200 ℃ (e) 1 400 ℃ (f) 冷却至 20 ℃

图 8 型砂的高温形态

2.7 差热分析和热重分析

对云溪环保型砂进行差热分析和热重分析，可以定性地了解型砂在升温过程中发生的相变。试验得到 DSC-TG 随着温度上升而变化的曲线，如图 9 所示。

型砂升温过程中，室温到 100 ℃，水蒸发吸热，使得总质量减少，DSC 曲线出现吸热峰，TG 曲线下滑；500～700 ℃，粘土类矿物受热分解，试样质量减少，DSC 曲线连续下滑，TG 曲线也连续下滑，粘土类矿物质量下降不到 1%；573 ℃附近，石英发生晶型转变，由低温型 α 石英转变为高温型 β 石英，该相变吸热且质量没有变化，DSC 出现吸热峰，TG 重量不变。

1 100～1 200 ℃：型砂开始发生熔融烧结，DSC

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

曲线出现转变点，TG 重量不变。热压强度的最大值出现在 1 100 ℃，温度继续升高，熔融程度变大，热压强度就下降了。云溪环保型砂经过浇注，型砂损失了一些水分和少量的粘土类矿物，型砂回用时，只需要再喷入一些水分就可以再次使用。

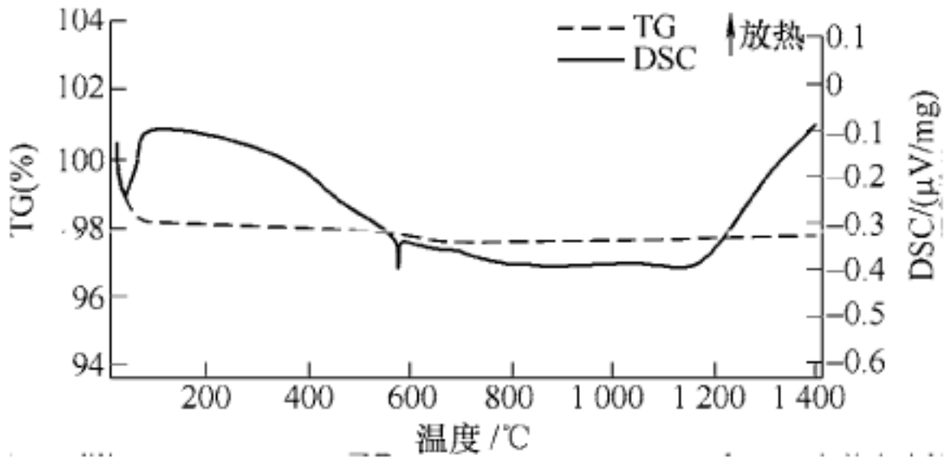


图 9　DSC-TG 试验曲线

3　浇注验证和生产应用

3.1　浇注验证

研究了云溪环保型砂性能之后，对云溪环保型砂进行浇注验证。

第一组用含水量 4%的 A 号新砂，第二组用含水量 11%的 B 号新砂。用两组型砂造型脱模情况都比较好，浇注完成，等待 30 min 后开箱，铸铁件表面均形成了一层易剥离的烧结层[10]。冷却至室温后，轻轻敲击铸件表面，烧结壳就脱落了。铸件的表面情况如图 10 所示，两组型砂浇注的铸件表面都比较光滑，没有出现粘砂、夹砂、砂眼、气孔等缺陷，铸件的质量很好。



(a) 第一组型砂浇注的铸件



(b) 第二组型砂浇注的铸件

图 10　试验室浇注的铸铁件试样

3.2　生产应用

云溪环保型砂在实验室研发成功后，于 2014 年 9 月开始，由浙江义乌云溪新材料科技有限公司投入批量生产。目前，已推广应用到浙江、江苏、安徽、山东、江西等地的 50 余家铸造企业，获得一致的好评。

4　结论

(1)　云溪环保型砂外观呈黄色，它全部由无机、无毒的材料组成，浇注过程中不会产生有毒气体，是一种环保的型砂。

(2)　云溪环保型砂可以通过更改其配方比例，或者放置一定的时间，使型砂的综合性能达到最佳，从而适应浇注不同的铸件。

(3)　云溪环保型砂的发气性相当低，透气性与煤粉湿型砂类似，能够有效减少气孔缺陷。

(4)　云溪环保型砂的热湿拉强度较高，高温热膨胀率小，能够有效防止夹砂缺陷，防止铸件变形。

(5)　用云溪环保型砂造型，在浇注过程中，形成内壁的高塑性层和高强度层，较长时间的浇注不会影响铸件尺寸精度，不会产生砂眼缺陷，使用其可以浇注受热作用剧烈的铸件。

(6)　用云溪环保型砂造型、浇注，铸件表面能形成易剥离的烧结壳，剥离后表面不粘砂，铸件质量好。

(7)　云溪环保铸造型砂已在浙江、江苏、山东、安徽、江西等地近 50 家铸造企业使用，获得了一致的好评。

参　考　文　献

[1] 吴继忠. 中国铸造业的环保问题[J]. 铸造，2009，58(10)：1038-1040.
WU Jizhong. Environmental protection of China foundry industry[J]. Foundry，2009，58(10)：1038-1040.

[2] 石德全. 造型材料[M]. 北京：北京大学出版社，2009.
SHI Dequan. Molding material[M]. Beijing：Peking University Press，2009.

[3] 宗倩，朱世根，骆祎岚，等. 黄壤土天然粘土砂湿型铸造工艺的应用研究[J]. 铸造，2009，58(7)：721-725.
ZONG Qian，ZHU Shigen，LUO Yilan，et al. Application of green sand casting process of yellow loam natural clay-bonded sand[J]. Foundry，2009，58(7)：721-725.

[4] 李元元，陈维平，黄丹，等. 铸造行业的节能减排现状及对策分析[J]. 铸造，2010，59(11)：1141-1147.
LI Yuanyuan，CHEN Weiping，HUANG Dan，et al.

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Energy conservation and emissions reduction and strategy involved in foundry industry[J]. Foundry，2010，59(11)：1141-1147.

[5] 桑小龙，朱世根，骆祎岚，等. 防止铸钢粘砂的黄壤土型砂性能与工艺研究[J]. 机械工程学报，2012，48(14)：64-69.
SANG Xiaolong，ZHU Shigen，LUO Yilan，et al. Influence of sintering behavior of natural clay-bonded sand on surface quality of steel castings[J]. Journal of Mechanical Engineering，2012，48(14)：64-69.

[6] 袁怀鹏，朱世根，骆祎岚，等. 黄壤土天然粘土砂湿型铸造工艺对铸铁件壁厚的适应性[J]. 铸造，2009，58(5)：498-501.
YUAN Huaipeng，ZHU Shigen，LUO Yilan，et al. Adaptability of natural yellow loam clay-bonded sand casting process to thickness of iron casting[J]. Foundry，2009，58(5)：498-501.

[7] 张锐，骆祎岚，殷梁，等. 黄壤土砂铸型与铸件界面烧结层的力学行为[J]. 机械工程学报，2011，47(2)：90-94.
ZHANG Rui，LUO Yilan，YIN Liang，et al. Mechanical property of the sintering layer at the interface of natural yellow clay-bonded sand mould and iron casting[J]. Journal of Mechanical Engineering，2011，47(2)：90-94.

[8] 杨振刚，朱世根，骆祎岚，等. 天然粘土砂烧结对铸铁件表面质量的影响[J]. 机械工程学报，2010，46(12)：65-69.
YANG Zhengang，ZHU Shigen，LUO Yilan，et al. Influence of sintering behaviour of natural clay sand on surface quality of iron casting[J]. Journal of Mechanical Engineering，2010，46(12)：65-69.

[9] 胡彭生. 型砂[M]. 上海：上海科学技术出版社，1994.
HU Pengsheng. Moulding sand[M]. Shanghai：Shanghai Science and Technology Press，1994.

[10] 林宗寿. 无机非金属材料工学[M]. 武汉：武汉理工大学出版社，2006.
LIN Zongshou. Process technology for inorganic non-metallic materials[M]. Wuhan：Wuhan University of Technology Press，2006.

作者简介：朱世根(通信作者)，男，1963 年出生，教授，博士研究生导师。主要研究方向为造型材料与铸造工艺、金属材料与高性能化。
E-mail：sgzhu@dhu.edu.cn
陶李洋，男，1991 年出生，硕士研究生。主要研究方向为造型材料与铸造工艺。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net