

新型无机粘结剂砂抗拉强度的试验研究

肖惠康, 殷亚军, 文艺贝, 彭 昕, 章顺亮, 万 鹏, 李远才, 周建新

(华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北武汉 430074)

摘要: 目前, 基于改性的新型无机粘结剂砂已成功运用于铸铝件的生产, 同时也满足了行业对环保的高要求。但新型无机粘结剂砂用于铸铁件的生产, 还存在较多问题, 如常温强度偏低, 尤其是高湿度环境下的强度低, 以及高温残留强度高, 有必要进行进一步的研究。为此, 本文经前期初步筛选试验, 最终选用一种新型无机粘结剂, 考察了诸多因素对芯砂试样强度的影响。结果表明, 在一定范围内, 粘结剂及促硬剂用量越大, 芯砂常温强度和高温残留强度越高; 随模具温度升高, 芯砂常温强度先升后降, 而残留强度受模具温度影响较小; 原砂对芯砂强度影响最大, 球形陶瓷砂良好的流动性及其物化特性提高了常温强度, 但不利于残留强度的降低, 而采用硅砂, 其残留强度较低; 经正交试验优化的工艺是: 使用50/100目硅砂, 粘结剂加入量2.4%, 促硬剂为粘结剂的50%, 模具温度180 °C, 芯砂24 h常温强度为2.71 MPa, 98%RH下的强度为2.39 MPa, 800 °C残留强度为0.13 MPa。

关键词: 无机粘结剂砂; 原砂; 常温强度; 高湿强度; 高温残留强度

近些年来, 由于树脂砂在铸造生产中导致的环境污染问题, 以水玻璃粘结剂为基的新型硅酸盐以及磷酸盐等无机粘结剂又受到了普遍的关注。相较于树脂砂, 无机粘结剂砂具有来源广泛、价廉、造型(芯)及铸件浇注时无有害气体产生的优势, 现成为造型材料发展的重点方向^[1-2]。随着对无机粘结剂性能的逐步提高和硬化机理研究深入, 其性能也得到了大幅度的提高, 并逐步接近树脂砂的水平^[3-4]。国内外也开发出基于改性硅酸盐粘结剂的新工艺, 并将其成功应用到铸钢件、汽车发动机用铝铸件的生产^[5-6]。但无机粘结剂砂在铸铁件生产中的应用, 仍存在着硬化速度慢、型芯砂强度低、高湿环境下抗吸湿性差, 以及溃散性差(高温残留强度高)等问题, 须进一步进行研究^[7]。本文选用一种国产新型无机粘结剂和两种原砂, 采用正交试验, 研究了粘结剂及促硬剂加入量、原砂种类及模具温度等对型芯砂24 h常温强度, 高湿强度和高温残留强度的影响, 以期得出较好的强度综合性能, 为该无机粘结剂砂在铸铁生产中的应用打下基础。将其替代树脂砂应用于铸件生产, 能大大减轻环境污染, 在追求碳中和、碳减排的当下具有较好的应用价值。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料及仪器设备

试验用材料主要由原砂、粘结剂、促硬剂组成。原砂有大林标准硅砂和球形陶瓷砂, 下文分别简称硅砂及陶瓷砂, 理化性质如表1、2所示。粘结剂及促硬剂为某公司提供的热芯盒无机粘结剂体系, 其理化指标如表3所示。

试验主要仪器设备: SAR-II智能温控覆膜砂制样机、电热烘干箱、马弗炉、PT-

表1 大林硅砂物理化学指标

Table 1 Physical and chemical indexes of the Dalin silica sand

SiO ₂ /%	Al ₂ O ₃ /%	角形系数	灼烧减量/%	含水量/%	含泥量/%	耐火度/°C	热膨胀系数/(°C ⁻¹)
≥92	<4.50	<1.25	<0.5	<0.3	<0.3	>1 450	5.5 × 10 ⁻⁷

作者简介:

肖惠康(1998-), 男, 研究生, 从事造型材料及铸造绿色化的研究工作。

E-mail: 3305579226@

qq.com

通讯作者:

殷亚军, 男, 副教授。E-mail:

yinyajun436@hust.edu.cn

中图分类号: TG221

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)

08-1012-05

收稿日期:

2022-02-22 收到初稿,

2022-03-15 收到修订稿。

表2 陶瓷砂物理化学指标
Table 2 Physical and chemical indexes of the ceramic sand

SiO ₂ /%	Al ₂ O ₃ /%	角形系数	热导率/(W·m ⁻¹ K ⁻¹)	含水量/%	热膨胀率/%	耐火度/℃	热膨胀系数/(℃ ⁻¹)
15~22	65~82	≤1.1	0.5~0.6	<0.1	0.50~0.65	≥1 800	6 × 10 ⁻⁶

表3 粘结剂及促硬剂理化指标
Table 3 Physical and chemical indexes of the binder and hardening agent

型号	外观	密度/(g·cm ⁻³)	粘度/(mPa·s)	应用范围
粘结剂M	透明或半透明溶液	1.42~1.52	100~180	铸钢、铸铁
促硬剂N	白色粉末	0.6~1.0	—	

1176电脑伺服式拉压力强度试验机、Sirion 200场发射扫描电子显微镜、精密电子天平。

1.2 试验流程

在试验过程中,先将原砂和促硬剂混合2 min至均匀,然后加入粘结剂混合2 min至均匀,再将混合料倒入设定好温度的覆膜砂高温制样机,将其压实压平,得半厚度标准8字抗拉试样,2 min后取模,具体制样流程如图1所示。

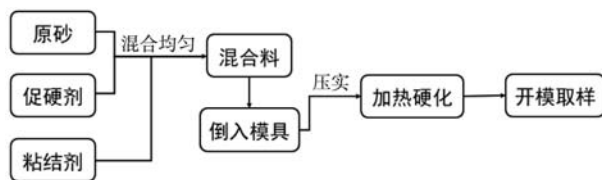


图1 型砂试样制备工艺流程图

Fig. 1 Process flow chart of the sand sample preparation

对于即时强度测试,取模后立即将其用伺服式电脑拉压力试验机测试即时强度;对于常温强度以及高湿度(98%RH)下常温强度测试,按要求放置在敞口玻璃器皿及恒定湿度的密封玻璃器皿中一定时间,再使用拉压力试验机测试常温强度;对于残留强度测试,需在干燥皿中保存24 h后,再放入相应温度马弗炉中30 min,随炉冷却至室温再用相应设备测试。在(19±6)℃、47%±7%RH的环境下进行试验,为减少影响试验误差,多次取样测试并计算平均值。

2 结果与分析

2.1 单因素试验研究

对于此无机粘结剂,有诸多工艺因素影响其在铸铁件中的应用。试验中,首先通过原砂种类及粒度、模具温度、粘结剂加入量及促硬剂含量的单因素试验,测试其型砂性能,具体结果如下。

2.1.1 原砂规格对试样强度的影响

原砂作为型砂最基本的组成物,其化学性质和物

理性状显著影响着型砂的工艺性能及铸件的质量。因此,可以根据具体工艺场景及需求,适当调整原砂类别,以保证较好工艺性能及节约成本。试验中,粘结剂M加入量为2%,促硬剂N加入量为原砂的0.8%,模具温度160℃,对比四种规格的原砂对试样强度的影响。

由表4可知,无论何种目数,陶瓷砂试样的各项粘结强度值均优于硅砂试样,其中常温抗拉强度值的差异较为明显,陶瓷砂试样的强度约为硅砂试样的1.2~1.5倍。而即时强度的差值较小,整体差异不明显。

表4 不同规格原砂对试样强度的影响
Table 4 Influence of different specifications of raw sand on the strength of the samples

组别	原砂规格	即时强度 /MPa	1 h强度 /MPa	24 h强度 /MPa	800℃残留 强度/MPa
1	40/70号硅砂	1.09	2.76	2.37	0.14
2	50/100号硅砂	1.35	3.09	2.68	0.16
3	40/70号陶瓷砂	1.25	2.98	2.52	2.05
4	50/100号陶瓷砂	1.52	4.29	3.89	3.81

2.1.2 模具温度对试样强度的影响

此工艺主要硬化方式为加热硬化。试验中,粘结剂M加入量为2%,促硬剂N加入量为原砂的0.8%,使用50/100号硅砂,对比不同模具温度对试样强度的影响(表5)。

表5 不同模具温度对试样强度的影响
Table 5 Influence of different mold temperature on the strength of the samples

模具 温度/℃	即时强度 /MPa	1 h强度 /MPa	24 h强度 /MPa	800℃残留 强度/MPa
140	0.93	2.21	1.75	0.18
160	1.35	3.09	2.68	0.16
180	1.53	3.37	2.85	0.16
200	1.32	2.41	1.63	0.17
220	1.24	2.28	1.51	0.21

从表5看出,随着模具温度逐渐升高,型砂试样的常温强度曲线趋势为先增后降,峰值在180℃附近,而残留强度受模具温度影响较小。

2.1.3 粘结剂加入量对试样强度的影响

试验中,使用40/70目陶瓷砂,促硬剂N加入量为砂重0.8%,模具加热温度180℃,研究粘结剂M加入量分别为1.6%、2.0%及2.4%对砂样强度的影响,具体如下表6所示。

表6 不同粘结剂加入量对试样强度的影响
Table 6 Influence of different amounts of the binder on the strength of the samples

粘结剂加入量/%	即时强度/MPa	1 h强度/MPa	24 h强度/MPa	800℃残留强度/MPa
1.6	0.89	2.12	2.08	2.54
2.0	1.25	2.32	1.59	2.47
2.4	1.13	2.54	2.16	3.25

由表6可知,随粘结剂加入量增加,型砂试样的即时强度、24 h强度的变化趋势均保持增长趋势。型砂试样的1 h强度及残留强度在2%时表现较好。

2.1.4 促硬剂含量对试样强度影响

试验中,使用40/70目陶瓷砂,粘结剂M加入量为2%,模具温度180℃,研究促硬剂N加入量分别为粘结剂M的30%、40%及50%对砂样强度的影响,具体如下表7所示。

表7 不同促硬剂加入量对试样强度影响
Table 7 Influence of different amounts of the hardening agent on the strength of the samples

促硬剂加入量/%	即时强度/MPa	1 h强度/MPa	24 h强度/MPa	800℃残留强度/MPa
30	1.07	2	2.08	2.54
40	1.25	2.32	1.59	2.47
50	1.26	2.88	2.16	3.25

由以上数据可知,促硬剂加入量在30%~50%范围内时,随着其含量的增多,试样的常温强度也随之增加,且即时强度与1 h强度在40%与50%表现较好。

2.2 正交试验结果分析

2.2.1 正交试验因素水平设计

为确定以最佳粘结材料配比和硬化工艺参数,采用四因素三水平正交试验,研究原砂规格(A)、模具温度(B)、粘结剂添加比例(C)、促硬剂添加比例(D)对型砂强度的影响,正交试验设计如表8、表9所示,粘结剂加入量为占砂重比例,促硬剂加入量为

占粘结剂的比例。测试性能为即时强度、24 h终强度、800℃残留强度以及98%RH强度。

表8 正交试验因素的水平设计
Table 8 Design of factors and levels for the orthogonal test

组别	原砂规格(A)	模具温度(B)/℃	粘结剂M加入量(C)/%	促硬剂N加入量(D)/%
1	50/100目硅砂	150	1.8	40
2	40/70目陶瓷砂	180	2.4	45
3	50/100目陶瓷砂	210	3.0	50

表9 正交试验表
Table 9 Orthogonal test table

编号	因素			
	原砂规格(A)	模具温度(B)/℃	粘结剂加入量(C)/%	促硬剂加入量(D)/%
1	A ₁	B ₁	C ₁	D ₁
2	A ₁	B ₂	C ₂	D ₂
3	A ₁	B ₃	C ₃	D ₃
4	A ₂	B ₁	C ₂	D ₃
5	A ₂	B ₂	C ₃	D ₁
6	A ₂	B ₃	C ₁	D ₂
7	A ₃	B ₁	C ₃	D ₂
8	A ₃	B ₂	C ₁	D ₃
9	A ₃	B ₃	C ₂	D ₁

2.2.2 正交试验结果与分析

正交试验结果如表10所示,并依其通过数据处理计算出各因素在三个水平上的指标平均值 k_1 、 k_2 、 k_3 和极差 R_A 、 R_B 、 R_C 、 R_D ,以此得极差图2,并进行如下分析。

表10 正交试验结果
Table 10 Results of the orthogonal test

强度/MPa	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\sigma_{\text{即}}$	1.42	1.53	2.06	3.14	2.61	1.9	3.98	2.5	1.87
$\sigma_{24\text{h}}$	1.82	2.34	2.17	3.38	2.67	1.78	3.86	3.71	3
$\sigma_{800^\circ\text{C}}$	0.21	0.07	0.27	4.81	3.87	2.54	5.54	5.4	3.87
$\sigma_{98\%RH}$	1.43	1.83	2.1	2.82	2.4	1.35	3.8	3.55	2.66

对于即时强度,基本每组试样即时强度均在1.4 MPa以上,能满足生产中脱模的需要。由极差分析结果,四因素对即时强度的影响大小顺序为A、C、B、D。原砂目数相同,使用陶瓷砂比使用硅砂能获得较高的即时强度;粘结剂、促硬剂的加入比例越高,型砂即时强度越高;随着模具温度的提升,即时强度呈现下降的趋势。

对于24 h终强度,极差比较分析知: $R_A > R_B > R_D >$

R_c ，即影响型砂常温24 h终强度的因素从大到小依次为原砂、模具温度、促硬剂比例及粘结剂比例。同等目数使用陶瓷砂制样的强度均值能达到3 MPa以上，比使用硅砂试样提高了45.03%；同种原砂目数越小，促硬剂比例更高，模具温度降低，24 h终强度越高；随粘结剂加入量的提升，常温24 h终强度呈现出先提高后降低的趋势。

经分析，98%RH强度的影响因素强弱与即时强度一致。陶瓷砂试样的抗吸湿性要强于硅砂试样，随着模具温度的提升，98%RH强度逐步下降；粘结材料加入量越多，其98%RH强度越高。经计算，基本每组试样在高湿度环境下强度为室内环境的70%以上，其抗吸湿性较好。

残留强度的极差呈现出较大差异，但与24 h终强度趋势一致。原砂规格影响最大，使用硅砂的试样残留强度均在0.3 MPa以下，而陶瓷砂试样均在3 MPa以上；模具温度越高，残留强度越低；添加的粘结剂及促硬剂越少，试样的残留强度越低。

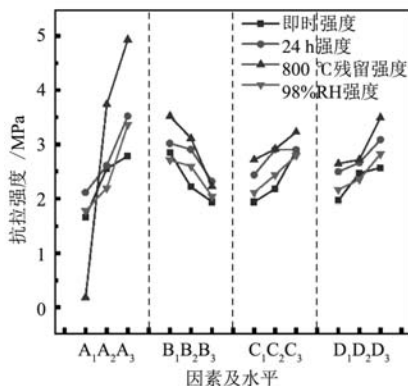


图2 正交试验极差分析图

Fig. 2 Range analysis of the orthogonal test

2.2.3 正交试验结果验证

在即时强度、24 h强度及98%RH强度测试中，最优组合均为A3B1C3D3，即使用50/100目陶瓷砂、模具温度150 °C、粘结剂M加入量为3.0%、促硬剂N加入量为50%，记为组1*；在残留强度测试中，最优组合为A1B3C1D1，即使用50/100目硅砂、模具温度210 °C、粘结剂M加入量为1.8%、促硬剂N加入量为40%，记为组2*。而对于新型无机粘结剂砂，相应推荐工艺为：40/70目陶瓷砂、模具温度180 °C、粘结剂比例1.8%、促硬剂比例40%，记为3*。此外，兼顾正交试验得到的工艺规律及使用成本，确认工艺组合为：50/100目硅砂、模具温度180 °C、粘结剂比例2.4%、促硬剂占粘结剂的50%，记为4*。对以上4组分别按照前述方法进行验证性的试验，结果如表11。

由以上试验结果可知，组合方案4*试样的即时强度及残留强度都是四组方案同性能中的最优值，24 h强

表11 新型无机粘结剂砂性能对比试验

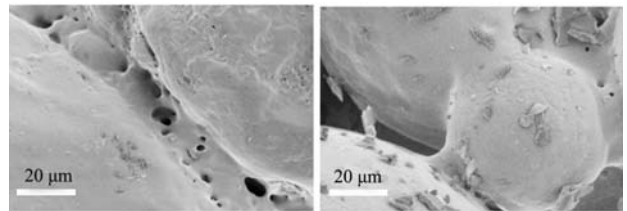
Table 11 Performance comparison test of the new inorganic binder sand

组别	$\sigma_{\text{即}}/\text{MPa}$	$\sigma_{24\text{h}}/\text{MPa}$	$\sigma_{800\text{ }^\circ\text{C}}/\text{MPa}$	$\sigma_{98\%\text{RH}}/\text{MPa}$
1*	1.62	5.16	4.29	3.95
2*	1.13	1.86	0.33	1.13
3*	1.85	1.98	3.36	1.73
4*	2.58	2.71	0.13	2.39

度及98%RH强度值也处于较高水平。因此，确定新型无机粘结剂砂的最终优化工艺为4*，即粘结剂加入量为2.4%、促硬剂加入量为50%、模具温度为180 °C、50/100目硅砂。

2.2.4 微观形貌分析

为进一步研究使用不同类型原砂在型砂残留强度方面的差异，利用SEM拍摄了同材料加入量下的试样经800 °C烧灼后砂粒及粘结桥的微观形貌。如图3a中，硅砂试样上面分布着大量气孔和细微的裂纹。而粘结剂M成分主要为复合硅铝酸盐溶液，并加入了少量有机物改性。粘结剂M含有的少量有机物在高温环境中发生了氧化还原反应，产生的气体和碳状残留灰分使粘结膜上产生大量气孔和裂纹，隔断了粘结网络的连续性，减小硅砂砂芯的高温残留强度。且粘结剂M硬化过程中，形成的三维胶凝网络与基体材料二氧化硅间的热膨胀系数不一致，随温度升高变形差异性增大，其结合的胶结面逐渐开裂，降低了其强度。



(a) 硅砂试样

(b) 陶瓷砂试样

图3 800 °C残留强度试样粘结剂形貌

Fig. 3 Microstructures of the sample with residual strength at 800 °C

对于陶瓷砂试样，虽然也存在有机物高温反应产生的气孔和裂纹，但由于其砂粒圆整度高、流动性好，粘结剂分布更为均匀及相应粘结桥更多，且三维网状凝胶与基体材料热膨胀系数差异较小，故残留强度较高，且无定形的促硬剂颗粒在高温下与陶瓷砂粒易生成陶质联结键，冷却后板结，所以相较天然砂不宜溃散。

3 结论

(1) 原砂的圆整度及热物性参数对新型无机粘结

剂砂性能有较大影响, 颗粒更圆的球形陶瓷砂流动性及紧实度更好, 粘结剂包覆更为均匀且粘结桥数目更多, 其试样常温、高温强度均高于硅砂试样, 同时其残留强度也大大高于硅砂试样。从改善芯砂溃散性的角度, 硅砂试样残留强度低较好。

(2) 粘结剂及促硬剂加入量越大, 芯砂常温强度也越高, 同时残留强度也高; 模具温度主要影响芯砂

常温强度, 趋势为随温度升高强度先升后降, 而残留强度受模具温度影响较小。

(3) 经正交试验, 最优的工艺参数为: 使用50/100目硅砂, 粘结剂加入量2.4%, 促硬剂为粘结剂的50%, 模具温度180℃, 芯砂24 h常温强度为2.71 MPa, 98%RH下的强度为2.39 MPa, 800℃残留强度为0.13 MPa, 芯砂综合性能良好。

参考文献:

- [1] 李远才. 铸造造型材料实用手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 5-10.
- [2] 李远才, 殷亚军. 造型材料发展新趋势与绿色化数字化技术应用研究 [C]// 2020中国铸造活动周论文集. 中国机械工程学会铸造分会, 2020: 412.
- [3] 周静一. 国内外水玻璃无机粘结剂在铸造生产中的应用及最新发展 [J]. 铸造, 2012 (3): 237-245.
- [4] 张喜, 朱世根, 骆祯岚. 水玻璃砂添加剂对溃散性及铸钢件粘砂缺陷的影响 [J]. 铸造, 2015, 64 (2): 166-170.
- [5] 刘加军, 姜廷春, 尹绍奎, 等. 新型酯硬化水玻璃砂在高锰钢铸造中的应用研究 [J]. 铸造, 2020, 69 (12): 1331-1334.
- [6] LEONID.ZARETSKIY. Modified silicate binder's new developments and applications [J]. International Journal of Metalcasting, 2016, 10 (1): 88-99.
- [7] 耿国锋, 申勇, 何齐书. 无机粘结剂和宝珠砂在球墨铸铁管行业的应用研究 [C]//2018全国铸铁管技术研讨会论文集. 中国金属学会铸铁管分会, 2018: 13-17.

Experimental Study on the Strength of New Inorganic Binder Sand

XIAO Hui-kang, YIN Ya-jun, WEN Yi-bei, PENG Xin, ZHANG Shun-liang, WAN Peng, LI Yuan-cai, ZHOU Jian-xin

(State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract:

In recent years, new inorganic binder sand based on modification has been successfully used in the production of aluminum casting, and it also meets the high requirements of environmental protection in the industry. However, there are still many problems in the production of cast iron, such as low strength at indoor temperature, especially in high humidity environment, and high residual strength at high temperature, so it is necessary to carry out further research. Therefore, after preliminary screening tests, a new inorganic binder was selected to investigate the influence of various factors on the strength of core sand samples. The results showed that in a certain range, the higher the amount of binder and hardening agent, the higher the normal temperature strength and high temperature residual strength of the core sand. With the increase of mold temperature, the strength of the core sand at room temperature increased first and then decreased, while the residual strength was less affected by the mold temperature. Raw sand had the greatest influence on the strength properties of the core sand. The good fluidity and physical and chemical properties of spherical ceramic sand improved the strength at room temperature, but were not conducive to the reduction of residual strength, while the residual strength of silica sand was lower. The optimized process by orthogonal test was as follows: using 50/100 silica sand, adding 2.4% binder, hardening agent 50% binder, mold temperature 180℃, the strength of the core sand at room temperature of 24 h was 2.71 MPa, the strength of the core sand at 98%RH was 2.39 MPa, the residual strength of the core sand at 800℃ was 0.13 MPa.

Key words:

inorganic binder sand; sand; normal temperature strength; high wet strength; high temperature residual strength