

基于陶瓷颗粒砂和硅酸盐无机粘结剂的砂型工艺性能试验

樊振中^{1,2} 陈 群³ 殷亚军⁴ 程 楠³ 李远才⁴

(1. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095; 2. 北京市先进铝合金材料及应用工程技术研究中心, 北京 100095; 3. 河南金耐源新材料科技有限公司, 郑州 450066; 4. 华中科技大学材料科学与工程学院, 武汉 430074)

摘 要 借助陶瓷颗粒砂成分、粒径与球形度测试, 结合单因素变量和5因素4水平正交试验, 完成了基于陶瓷颗粒砂和硅酸盐无机粘结剂的砂型工艺性能试验。结果表明, 单因素变量工艺性能试验最佳陶瓷颗粒砂规格为650目, 铸型室温抗拉强度随热芯盒模具加热温度持续增加而连续上升, 热芯盒模具加热时间对铸型室温抗拉强度影响较小, JNY-W81型粘结剂添加含量增加时铸型室温抗拉强度不断上升, 随着JNY-A型促硬剂添加含量增加, 铸型强度呈现出先上升后下降的变化。由5因素4水平正交试验工艺性能试验和各因素主效应检验分析可知, 各因素影响权重依次为陶瓷颗粒砂规格、JNY-W81型粘结剂添加含量、热芯盒模具加热时间和热芯盒模具加热温度。铸型10 min室温抗拉强度、24 h室温抗拉强度和10 min室温抗压强度峰值分别为3.528 MPa、2.632 MPa和11.659 MPa。

关键词 陶瓷颗粒砂; 硅酸盐无机粘结剂; 低压铸造; Al合金; 工艺性能

中图分类号 TG221; TG249.2; TG146.21

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.Y20250008

Performance of Sand Mold Process Based on Ceramic Sand and Silicate Inorganic Adhesive

FAN Zhenzhong^{1,2}, CHEN Qun³, YIN Yajun⁴, CHENG Nan³, LI Yuancai⁴

[1. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095; 2. Beijing Advanced Engineering Technology and Application Research Center of Aluminum Materials, Beijing 100095; 3. Jinnaiyuan(Henan) Industry Technology Co.Ltd., Zhengzhou 450066; 4. School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074]

Abstract: The composition, particle size, and sphericity of ceramic sand were tested, and the performance of sand mold process based on ceramic sand and silicate inorganic adhesive were analyzed combined with single factor variable and orthogonal experiment. The results indicate that the optimal particle size in the single factor variable process performance test is 650 mesh, meanwhile the tensile strength is increased continuously with the addition of heating temperature, and the heating time shows a faint influence. With the increasing content of JNY-W81 inorganic adhesive, the tensile strength is increased continuously, which shows a trend of first rising and then falling with the growing content of JNY-A hardening accelerator. According to the orthogonal experiment and main factor analysis test results, the influence weights of each factor are determined as ceramic sand particle size, contents of JNY-W81 inorganic adhesive, heating time and heating temperature. The peak values of tensile strength at 10 min and 24 h are 3.528 MPa and 2.632 MPa, respectively, and compressive strength at 10 min is 11.659 MPa.

Key Words: Ceramic Sand, Silicate Inorganic Adhesive, Low-pressure Casting, Al Alloy, Processing Properties

铝合金密度低、比强度和比刚度高、耐蚀性好且具有良好的加工成形性能, 在航空航天领域得到了广泛的应用。与锻压、焊接、铆接等制造工艺相比, 铸造成形可实现薄壁复杂结构的一体化成形, 实现复杂结构

制件的整体减重, 适用于军工装备领域复杂结构制件的批量化生产制造。随着我国“双碳”战略的实施, 短周期低成本制造已成为复杂结构制件铸造工艺领域的研究热点。与传统砂型铸造相比, 选用金属型低压铸

收稿日期: 2025-04-11; 修订日期: 2025-05-01

基金项目: 院重点领域技术攻关项目(KJSZ220203)

第一作者简介: 樊振中, 男, 1985年出生, 高级工程师, E-mail: fanzhenzhong2010@163.com

引用格式: 樊振中, 陈群, 殷亚军, 等. 基于陶瓷颗粒砂和硅酸盐无机粘结剂的砂型工艺性能试验[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(10): 1543-1550.

FAN Z Z, CHEN Q, YIN Y J, et al. Performance of sand mold process based on ceramic sand and silicate inorganic adhesive[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(10): 1543-1550.

造,通过在金属型中预埋整体型芯实现薄壁复杂结构铸件的精密成形,缩短整体砂型的生产周期与制造成本,具有较好的经济效益。

常规的树脂砂型芯耐高温性能差、有机树脂灼烧后发气量大,在用于金属型低压铸造时易在浇注阶段挥发产生气体,导致铸件产生缩松、皮下气孔等缺陷。实现高抗压强度、高尺寸精度和低发气量型芯的制备成为突破铝合金铸件金属型低压铸造工艺的关键,因此需要开发出适用于金属型低压铸造的型砂及低发气量的无机粘结剂。目前广泛使用的无机粘结剂主要包括水玻璃无机粘结剂和磷酸盐无机粘结剂,其中水玻璃粘结剂固化强度高但流动性差、硬化速度慢、溃散性差,磷酸盐粘结剂高温强度高但初始起模强度低、流动性和抗吸湿性较差。张猛等^[1]通过优化氧化硅、氧化铝、氧化铁和碱土金属氧化物的添加含量,调控了无水玻璃粘结剂的烧结点;刘伟华等^[2]采用氢氧化钾、焦磷酸钠、硅烷进行改性,改善了水玻璃粘结剂的溃散性;于志勇^[3]采用钾离子进行改性,提高了水玻璃粘结剂的流动性能。忻方海等^[4]通过添加KOH、微硅粉结合热芯盒工艺提高了水玻璃粘结剂的抗拉强度和抗吸湿性。张宏奎等^[5]采用水玻璃粘结剂冷芯盒工艺,验证了用于生产汽车铸铁件的可行性。张友寿等^[6-7]通过改性单钠磷酸盐,获得了一种高稳定性呈胶体状态的复合钠磷酸盐基粘结剂,改善了磷酸盐粘结剂的溃散性。吴景峰等^[8]采用复合磷酸铝无机粘结剂射芯+吹热空气硬化+模具加热硬化工艺进行了汽车铸铁件生产试制,生产成本可降低10%以上。李良锋^[9]研究了ZnO、CuO、Cr₂O₃含量对磷酸铝粘结剂固化时间和涂挂性能的影响,确定了各氧化物的最佳添加含量。石南起等^[10]、JENS等^[11]对磷酸盐粘结剂进行硼改性并添加聚乙烯醇,改善了磷酸盐粘结剂的吸湿性和脱模性能。梁含雪等^[12]添加柠檬酸、含硼改性剂和过渡族金属化合物提高了磷酸盐粘结剂的流动性能。程楠等^[13]、宋峰^[14]通过引入Cr³⁺,加速磷酸铝粘结剂脱水并改善了其低温吸水性,提高了粘结效果。李潇咏等^[15]以磷酸二氢铝为粘合剂,添加氧化铝、氧化铁、硅溶胶、膨润土和聚乙烯醇制备出了磷硅酸铝粘结剂,在铸钢件生产时提高了粘结剂的耐高温性能。赵雨珊等^[16]以氧化镁和改性磷酸盐制备出了磷酸镁粘结剂,通过调整氧化镁和改性磷酸盐的添加比例,改善了粘结剂的抗吸湿性。贾鑫^[17]采用柠檬酸、苹果酸溶液和三乙醇胺对磷酸盐粘结剂进行改性,提高了磷酸盐粘结剂的抗吸湿性。徐昕^[18]采用磷酸铝粘结剂实现了超低收缩率陶瓷器件的构筑成形。

目前国内已开展的水玻璃无机粘结剂和磷酸盐无

机粘结剂多偏重于铸钢、铸铁的使用研究,针对铝合金铸件开展的无机粘结剂研究的报道较少。课题组开发了一种适用于铝合金铸件金属型低压铸造工艺的新型硅酸盐无机粘结剂,并通过添加微硅粉附加物促进了缩合反应,降低了环境湿度对粘结网络强度的影响,解决了传统无机粘结剂抗吸湿性差的问题;结合陶瓷颗粒砂和机械干法砂再生循环工艺可将铝合金铸件批量生产时的固体废弃物排放量降低75%以上^[19-20]。本研究开展基于陶瓷颗粒砂和硅酸盐无机粘结剂的砂型工艺性能试验研究,以期为铝合金铸件金属型低压铸造选材提供参考。

1 试验材料与方法

表1为陶瓷颗粒砂用于铸造成形时的工艺优点,图1为本试验制备的不同规格陶瓷颗粒砂实物示意图。陶瓷颗粒砂采用以氧化铝为主要成分的煅烧铝矾土,经熔融、喷吹、筛分后在电弧熔融装置中采用雾化喷吹方式进行制备。陶瓷颗粒砂的化学成分采用X射线荧光光谱仪进行测定,平均粒径采用筛分法进行测定,测试设备为SSD型电磁偏震式筛砂机和电子分析天平。陶瓷颗粒砂平均粒径测定时首先采用电子分析天平称量出不同规格各筛分筛上保留砂粒质量占砂样总质量的质量分数,再乘以细度因数,见表2,然后再将各乘积相加,用乘积总和除以各筛分筛上保留砂粒质量分数的总和,对数值进行修约取整,按以下公式计算得到各个规格陶瓷颗粒砂的平均细度,换算得到陶瓷颗粒砂的平均粒径。

$$S_{AF} = \frac{\sum P_n X_n}{\sum P_n} \quad (1)$$

式中, S_{AF} 为平均细度; P_n 为任一筛上保留砂粒质量占总质量的质量分数; X_n 为细度因数; n 为筛号。

$$S_w = \frac{1}{D} \sqrt{\frac{\epsilon^3}{h}} K \sqrt{t} \quad (2)$$

式中, S_w 为实际比表面积, cm^2/g ; D 为砂柱体积质量, g/cm^3 ; ϵ 为陶瓷颗粒砂孔隙率, $\epsilon = 1 - D/2.64$; h 为砂柱高度, cm ; K 为仪器常数; t 为数码管计时平均时长, s 。

$$K_n = \frac{6}{D_i d} \quad (3)$$

式中, K_n 为比表面积系数, cm^2/g ; D_i 为相邻两筛网筛孔边长平均值, cm ; d 为陶瓷颗粒砂体积质量, $3.5 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

$$S_T = \frac{\sum P_n K_n}{\sum P_n} \quad (4)$$

式中, S_T 为理论比表面积, cm^2/g 。

陶瓷颗粒砂的角形因数是陶瓷颗粒砂实际与理论

表 1 陶瓷颗粒砂用于铸造成形时的工艺优点

Tab.1 Process advantages of ceramic sand for casting mold		
领域	应用优势	工艺优点
环境保护	降低铸造生产工业固体废物	耐磨、机械干法再生时微粉、粉尘排放少
	防止硅肺	不含游离硅酸、微粉率低、砂尘释放量低
降低铸造缺陷	减少机械粘砂、化学粘砂	耐火度高
	降低凝固变形	25~800℃范围不发生相变、膨胀系数小
	减少气孔缺陷	球形度高、粘结剂用量少、气体排放量低
	降低“飘芯”	密度大、充型浇注阶段不易上浮
	提高型砂溃散性	角形系数小、流动性好、易振击溃散

表 2 陶瓷颗粒砂各筛分筛号对应的细度因数

Tab.2 Fineness factor corresponding to each sieve number of ceramic sand												
筛号	6	12	20	30	40	50	70	100	140	200	270	筛盘
细度因数	3	5	10	20	30	40	50	70	100	140	200	300

表 3 陶瓷颗粒砂各筛分筛号对应的比表面积系数

Tab.3 Specific surface area coefficient corresponding to each sieve number of ceramic sand												cm ² /g
筛号	6	12	20	30	40	50	70	100	140	200	270	筛盘
比表面积系数	—	6.79	13.45	23.65	33.45	47.29	66.97	94.72	133.93	189.42	267.85	469.67

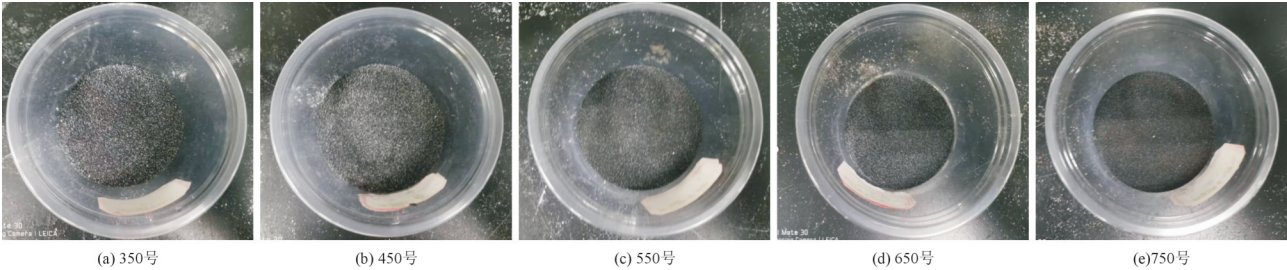


图 1 不同规格陶瓷颗粒砂实物示意图

Fig.1 Schematic diagram of ceramic sand with different specifications

表 4 为不同规格陶瓷颗粒砂的化学成分测试结果。可以看出,陶瓷颗粒砂主要由 Al₂O₃、SiO₂、TiO₂和 Fe₂O₃组成,其中 Al₂O₃和 SiO₂为主要成分,不同规格陶瓷颗粒砂中 Al₂O₃占 70%~71%(质量分数,下同), SiO₂占 19%~23%, TiO₂占 3%~5%, Fe₂O₃占 2%~3.5%。随着陶瓷颗粒砂规格的不断上升,陶瓷颗粒砂中 Al₂O₃和 SiO₂含量连续增加, Al₂O₃含量由 70.26% 升至 70.84%, SiO₂含量由 19.05% 增至 22.26%; TiO₂和

表 4 不同规格陶瓷颗粒砂化学成分

Tab.4 Chemical composition of ceramic sand with different specification						%
规格	w _B					
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	其他	
350 号	70.26	19.05	4.58	3.15	2.96	
450 号	70.39	21.30	3.55	2.86	1.90	
550 号	70.89	21.55	3.95	2.98	0.63	
650 号	70.80	22.16	3.38	2.54	1.02	
750 号	70.84	22.26	3.22	2.32	1.46	

比面积的比值。测定时首先称取清洗杂质并烘干的砂样(50±0.1) g,然后将砂样倒入测定仪试管中,并用小木棒轻击试管直至砂子体积基本恒定为止,记录砂子体积 V 和砂柱高度 h,然后将试管固定在测试设备底座并密封。启动电源,按下“复位”和“吸气”按钮,将砂柱液面升至 M 处;再按下“试验”按键,当砂柱液面降至 M₀时停止,记录数码管计时时长。重复以上操作步骤测试 5 次,去掉最大值和最小值计算得到数码管平均计时时长 t,计算陶瓷颗粒砂的实际比表面积 S_w。计算各筛号保留陶瓷颗粒砂质量占砂样总质量的质量分数,再乘以各比表面积系数,见表 3,计算得到陶瓷颗粒砂的理论比表面积 S_T。

Fe₂O₃含量连续下降, TiO₂含量由 4.58% 降至 3.22%, Fe₂O₃含量由 3.15% 降至 2.32%。表 5 为不同规格陶瓷颗粒砂的平均粒径和角形因数测试结果。可以看出, 350、450、550、650 和 750 号陶瓷颗粒砂的平均粒径分别为 0.61、0.51、0.29、0.27 和 0.27 mm。

表 5 不同规格陶瓷颗粒砂平均粒径和角形因数

Tab.5 Average particle size and angular shape factor of ceramic sand with different specification		
规格	平均粒径/mm	角形因数
350 号	0.61	1.06
450 号	0.51	1.04
550 号	0.29	1.05
650 号	0.27	1.02
750 号	0.20	1.02

本研究所用无机粘结剂为硅酸盐无机粘结剂,由 JNY-W81 型粘结剂和 JNY-A 型促硬剂组成,表 6 和表 7 为 JNY-W81 型粘结剂和 JNY-A 型促硬剂的理化性

能,图2为JNY-W81型粘结剂和JNY-A型促硬剂实物示意图。将陶瓷颗粒砂与JNY-W81型粘结剂搅拌均匀后,再添加JNY-A型促硬剂混合搅拌1.0~1.5 min,随后填充至热芯盒制样机模具中,压实刮平后进行加热,待陶瓷颗粒砂硬化后制备得到标准“8”字形和圆柱形砂型拉伸试样。从“8”字形制样机模具取出室温放置10 min进行测试即为即时室温抗拉强度,室温放入干燥皿器具24 h进行测试即为24 h室温抗拉强度。从圆柱形制样机模具中取出室温放置10 min进行测试即为室温抗压强度,每个测试制备6个试样,去掉测试最大值和最小值,求取平均值作为测试结果。

表6 JNY-W81型粘结剂理化性能(25℃)

Tab.6 Physical and chemical properties of JNY-W81 silicate inorganic adhesive (25℃)				
黏度/ (mPa·s)	密度/ (g·cm ⁻³)	24 h抗拉强度/ MPa	可使用时间/min	外观
100~180	1.45~1.52	0.5~2.8	10~120	半透明淡黄色液体

表7 JNY-A型促硬剂理化性能(25℃)

Tab.7 Physical and chemical properties of JNY-A hardening accelerator (25℃)		
堆积密度/(g·cm ⁻³)	外观	应用范围
0.6~1.0	白色粉末	铸钢、有色金属

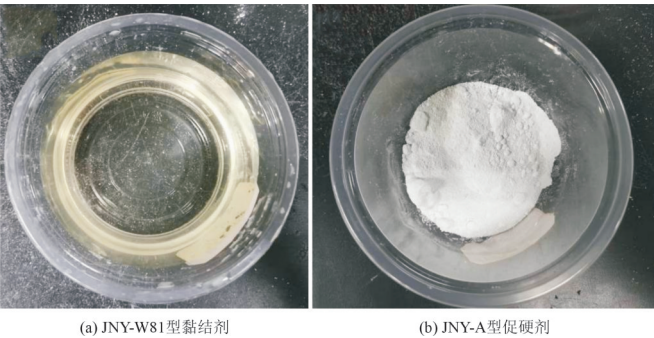


图2 JNY-W81型粘结剂与JNY-A型促硬剂实物

Fig.2 Entities of JNY-W81 silicate inorganic adhesive and JNY-A hardening accelerator

2 试验结果及分析

2.1 单因素变量工艺性能试验分析

本研究选用了5种不同规格的陶瓷颗粒砂,设计了单因素变量工艺性能试验,分别研究了陶瓷颗粒砂规格、热芯盒模具加热温度、热芯盒模具加热时间、JNY-W81型粘结剂添加量和JNY-A型促硬剂添加量对铸型室温抗拉强度的影响,结果见图3。图3a中热芯盒模具加热温度固定为180℃,热芯盒模具加热时间设定为300 s,JNY-W81型粘结剂添加量占陶瓷颗粒砂总质量的2%,JNY-A型促硬剂添加量占JNY-W81型粘结剂

总质量的50%。可以看出,不同规格陶瓷颗粒砂的铸型均呈现出了较好的室温抗拉强度,其中650号规格陶瓷颗粒砂铸型10 min和24 h室温抗拉强度达到峰值,分别为2.994 MPa和3.426 MPa。分析认为,当陶瓷颗粒砂规格较小时,平均粒径较大的陶瓷颗粒砂流动性较差,在与JNY-W81型粘结剂和JNY-A型促硬剂搅拌混制时易混制不均匀,不利于硅酸盐无机粘结剂的热固化,导致铸型室温抗拉强度偏低;当陶瓷颗粒砂规格较大时,平均粒径较小的陶瓷颗粒砂在与JNY-W81型粘结剂和JNY-A型促硬剂搅拌混制时,陶瓷颗粒砂的堆叠紧实度较高,陶瓷颗粒砂的两两相邻填充间隙较小,JNY-W81型粘结剂和JNY-A型促硬剂很难均匀包裹在陶瓷颗粒砂表面,导致硅酸盐无机粘结剂的热固化效果难以发挥,铸型室温抗拉强度偏低。图3b中,热芯盒模具加热温度区间设置为160~200℃,热芯盒模具加热温度间隔变量为10℃。可以看出,10 min室温抗拉强度在180℃热芯盒模具加热温度下达到峰值,为2.547 MPa;24 h室温抗拉强度在190℃时达到峰值,为3.48 MPa。随着热芯盒模具加热温度的连续上升,陶瓷颗粒砂和无机粘结剂铸型室温抗拉强度整体呈现出上升趋势。图3c中,热芯盒模具加热时间区间设置为240~360 s,热芯盒模具加热时间间隔变量为30 s。可以看出,热芯盒模具加热时间对陶瓷颗粒砂和无机粘结剂铸型室温抗拉强度影响较小,铸型10 min室温抗拉强度为2.14~2.57 MPa,铸型24 h室温抗拉强度分布在2.11~2.55 MPa;240 s、270 s热芯盒模具加热时间下铸型24 h室温抗拉强度略高于铸型10 min室温抗拉强度,热芯盒模具加热300、330和360 s时铸型10 min室温抗拉强度略高于24 h室温抗拉强度。考虑到热芯盒模具加热能耗,240 s模具加热时间的铸型可同步获得较佳的10 min室温抗拉强度和24 h室温抗拉强度。图3d中,JNY-W81型粘结剂添加量区间设置为1.25%~2.25%,JNY-W81型粘结剂添加量间隔变量为0.25%。可以看出,当JNY-W81型粘结剂添加量为2.00%时,铸型10 min室温抗拉强度取得最高值,为2.547 MPa;当JNY-W81型粘结剂添加量为2.25%时,铸型24 h室温抗拉强度取得最高值,为2.244 MPa,且随着JNY-W81型粘结剂添量的增加,铸型室温抗拉强度整体呈现出上升趋势,且2.25%的JNY-W81型粘结剂添加含量下铸型10 min室温抗拉强度和24 h室温抗拉强度均明显高于1.25%的添加量。JNY-A型促硬剂添加量的影响见图3e,JNY-A型促硬剂添加量区间设置为40%~60%,JNY-A型促硬剂添加量间隔变量为5%。可以看出,铸型10 min室温

抗拉强度最高值为 2.547 MPa,此时 JNY-A 型促硬剂添加量为 50%;铸型 24 h 室温抗拉强度最高值为 2.51 MPa,此时 JNY-A 型促硬剂添加量为 55%。随着 JNY-A 型促硬剂添加量的持续增加,铸型室温抗拉强度呈现出先上升后下降的变化趋势,当 JNY-A 型促硬剂添加量在 50%~55% 时可以取得较好的室温抗拉强度。分析认为 JNY-W81 型粘结剂和 JNY-A 型促硬剂在加热固化过程中,会发生交联反应,包裹在陶瓷颗粒砂外表面并形成一层硬化层,提高铸型的室温抗

拉强度;当粉末状 JNY-A 型促硬剂添加量过高时,聚集的 JNY-A 型促硬剂团聚在一起,分散在 JNY-W81 型粘结剂凝胶网络结构中,在消耗 JNY-W81 型粘结剂有效含量的同时,导致部分陶瓷颗粒砂无法覆盖硅酸盐无机粘结剂,造成铸型室温抗拉强度有所下降。因此,添加适量的 JNY-A 型促硬剂可有效提高铸型的室温抗拉强度,铸型 10 min 室温抗拉强度稳定在 2.27~2.55 MPa,铸型 24 h 室温抗拉强度稳定在 2.11~2.51 MPa。

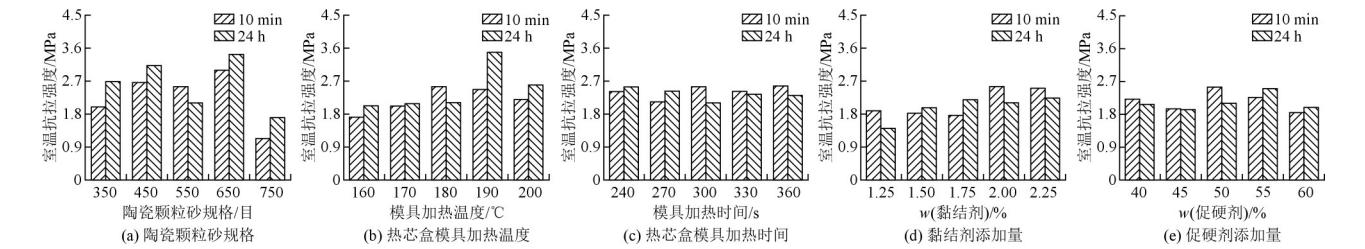


图3 陶瓷颗粒砂与硅酸盐无机粘结剂铸型单因素变量工艺性能试验分析结果

Fig.3 Results of single-factor variable process performance between ceramic sand and silicate inorganic adhesive

2.2 正交试验工艺性能分析

为了综合分析陶瓷颗粒砂规格、热芯盒模具加热温度、热芯盒模具加热时间、JNY-W81 型粘结剂添加

含量和 JNY-A 型促硬剂添加量对陶瓷颗粒砂和硅酸盐无机粘结剂铸型室温抗拉强度及抗压强度的影响,试验设计了 5 因素 4 水平正交试验,并对不同因素水平下铸型工艺性能进行了试验分析,结果见表 8。

表 8 5 因素 4 水平正交试验设计表和铸型室温强度测试结果

Tab.8 5 factor and 4 level orthogonal experimental design table and room temperature strength test results of sand mold

序号	陶瓷颗粒砂规格/目	热芯盒模具加热温度/℃	热芯盒模具加热时间/s	JNY-W81 型粘结剂添加含量/%	JNY-A 型促硬剂添加含量/%	10 min 室温抗拉强度/MPa	24 h 室温抗拉强度/MPa	10 min 室温抗压强度/MPa
1	450	180	300	2.00	45	3.245	2.479	8.144
2	450	190	240	2.25	55	3.528	2.577	8.263
3	450	170	330	1.50	50	2.985	2.073	8.769
4	450	200	270	1.50	40	2.281	1.127	4.956
5	550	200	240	1.75	45	3.023	2.632	8.366
6	550	170	300	1.50	55	2.308	2.197	9.038
7	550	180	330	2.25	40	2.646	1.770	7.213
8	550	190	270	2.00	50	2.789	2.022	8.856
9	650	200	300	2.25	50	3.485	2.315	11.659
10	650	170	240	2.00	40	2.099	1.906	7.359
11	650	190	330	1.50	45	1.901	1.682	8.097
12	650	180	270	1.75	55	2.046	2.517	9.713
13	750	180	240	1.50	50	1.170	0.709	3.694
14	750	190	300	1.75	40	1.397	1.394	6.598
15	750	170	270	2.25	45	1.587	1.135	6.041
16	750	200	330	2.00	55	0.999	1.463	7.984

采用 SPSS 数据统计软件一般线性模型中的单变量分析对陶瓷颗粒砂与硅酸盐无机粘结剂铸型室温强度测试结果进行了主效应检验。考虑到 JNY-A 型促硬剂主要作用是影响 JNY-W81 型粘结剂的交联硬化效果,因此在做主效应检验时,固定因子中不添加 JNY-A

型促硬剂添加量进行分析。表 9 为铸型 10 min 室温抗拉强度主效应检验表,图 4 为铸型 10 min 室温抗拉强度测试结果和不同因素的估算边际平均值得轮廓图。由表 9 可知,陶瓷颗粒砂规格对铸型 10 min 室温抗拉强度存在明显影响,显著性为 0.039(<0.05);热芯盒模具加热

表 9 铸型 10 min 室温抗拉强度主效应检验表($R^2=0.938$)

Tab.9 Main effect test table of tensile strength of mold in 10 min at room temperature ($R^2=0.938$)

数据源	Ⅲ类平方和	自由度	均方	<i>F</i>	显著性
修正模型	9.083 ^a	12	0.757	3.774	0.151
截距	87.839	1	87.839	438.030	<0.001
陶瓷颗粒砂规格	6.720	3	2.240	11.171	0.039
热芯盒模具加热温度	0.114	3	0.038	0.190	0.897
热芯盒模具加热时间	0.621	3	0.207	1.033	0.490
JNY-W81 型粘结剂添加量	1.627	3	0.542	2.704	0.218
误差	0.602	3	0.201		
总计	97.523	16			
修正后总计	9.684	15			

温度、热芯盒模具加热时间和 JNY-W81 型粘结剂添加量对铸型 10 min 室温抗拉强度影响较小,且影响权重依次为 JNY-W81 型粘结剂添加量、热芯盒模具加热时间和热芯盒模具加热温度。由图 4 可知,在选用陶瓷颗粒砂与硅酸盐无机粘结剂进行工业化批量连续铸型生产时(铸型造型后在 10 min 内完成使用,适用于批量化连续生产的铝合金铸件产品),陶瓷颗粒砂规格应选择为 450 目,热芯盒模具温度为 200 ℃,热芯盒模具加热时间为 300 s,JNY-W81 型粘结剂添加含量为 2.25%。

表 10 为铸型 24 h 室温抗拉强度主效应检验表,图 5 为铸型 24 h 室温抗拉强度测试结果和不同因素的估算

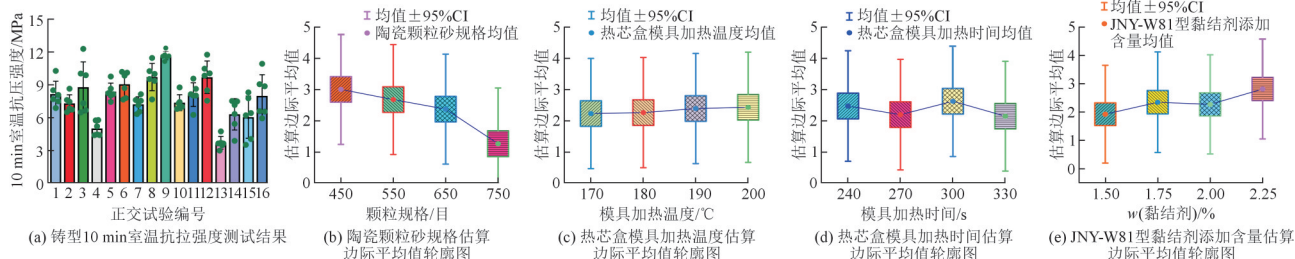


图 4 铸型 10 min 室温抗拉强度测试结果和不同因素的估算边际平均值轮廓图

Fig.4 Tensile strength of mold in 10 min at room temperature and estimated marginal mean average diagrams of different factors

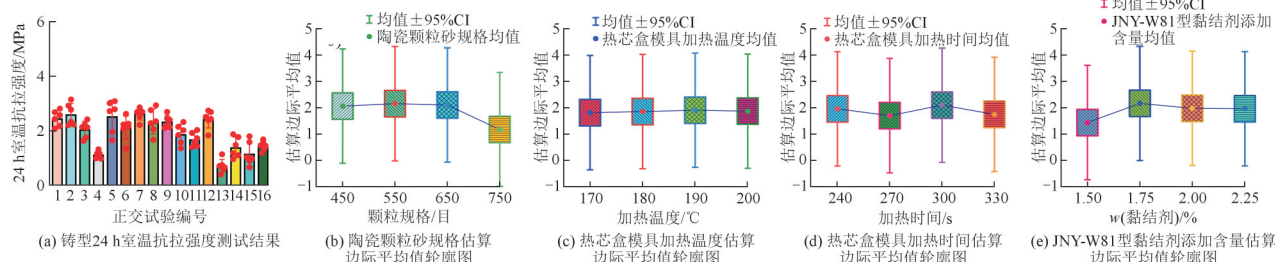


图 5 铸型 24 h 室温抗拉强度测试结果和不同因素的估算边际平均值轮廓图

Fig.5 Tensile strength of mold in 24 h at room temperature and estimated marginal mean average diagrams of different factors

表 11 为铸型 10 min 室温抗压强度主效应检验表,图 6 为铸型 10 min 室温抗压强度测试结果和不同因素

的估算边际平均值轮廓图。由表 10 可知,陶瓷颗粒砂规格、热芯盒模具加热温度、热芯盒模具加热时间、JNY-W81 型粘结剂添加量对铸型 24 h 室温抗拉强度均未产生明显影响,显著性均大于 0.05;铸型 24 h 室温抗拉强度各因素影响权重依次为陶瓷颗粒砂规格、JNY-W81 型粘结剂添加量、热芯盒模具加热时间和热芯盒模具加热温度。由图 5 可知,在选用陶瓷颗粒砂与硅酸盐无机粘结剂进行工业化非批量铸型生产时(铸型造型 24 h 后进行使用,适用于多品种小批量铸件产品),陶瓷颗粒砂规格应选择为 550[#],热芯盒模具温度选择为 190 ℃,热芯盒模具加热时间选择为 300 s,JNY-W81 型粘结剂添加量选择为 1.75%。

表 10 铸型 24 h 室温抗拉强度主效应检验表($R^2=0.824$)

Tab.10 Main effect test table of tensile strength of mold in 24 h at room temperature($R^2=0.824$)

数据源	Ⅲ类平方和	自由度	均方	<i>F</i>	显著性
修正模型	4.218 ^a	12	0.352	1.172	0.509
截距	56.243	1	56.243	187.544	<0.001
陶瓷颗粒砂规格	2.267	3	0.876	2.920	0.201
热芯盒模具加热温度	0.017	3	0.006	0.019	0.996
热芯盒模具加热时间	0.410	3	0.137	0.455	0.733
JNY-W81 型粘结剂添加量	1.164	3	0.388	1.294	0.419
误差	0.900	3	0.300		
总计	61.360	16			
修正后总计	5.118	15			

的估算边际平均值轮廓图。由表 11 可知,陶瓷颗粒砂规格、热芯盒模具加热温度、热芯盒模具加热时间、

表 11 铸型 10 min 室温抗压强度主效应检验表($R^2=0.794$)
Tab.11 Main effect test table of compressive strength of mold in 10 min at room temperature ($R^2=0.794$)

数据源	Ⅲ类平方和	自由度	均方	F	显著性
修正模型	42.030 ^a	12	3.502	0.963	0.589
截距	972.660	1	972.660	267.486	<0.001
陶瓷颗粒砂规格	21.339	3	7.113	1.956	0.298
热芯盒模具加热温度	2.356	3	0.785	0.216	0.880
热芯盒模具加热时间	8.440	3	2.813	0.774	0.581
JNY-W81 型粘结剂添加量	9.894	3	3.298	0.907	0.531
误差	10.909	3	3.636		
总计	1 025.599	16			
修正后总计	52.939	15			

JNY-W81 型粘结剂添加量对铸型 10 min 室温抗压强度均未产生明显影响,显著性均大于 0.05;铸型 10 min 室温抗压强度各因素影响权重依次为陶瓷颗粒砂规格、JNY-W81 型粘结剂添加量、热芯盒模具加热时间和热芯盒模具加热温度。由图 6 可知,在选用陶瓷颗粒砂与硅酸盐无机粘结剂进行型芯生产时(型芯造型 10 min 后进行放置,适用于复杂型腔结构铸件内置型芯造型使用),陶瓷颗粒砂应选择为 650 号,热芯盒模具温度选择为 200 ℃,热芯盒模具加热时间选择为 300 s,JNY-W81 型粘结剂添加量选择为 1.75%。

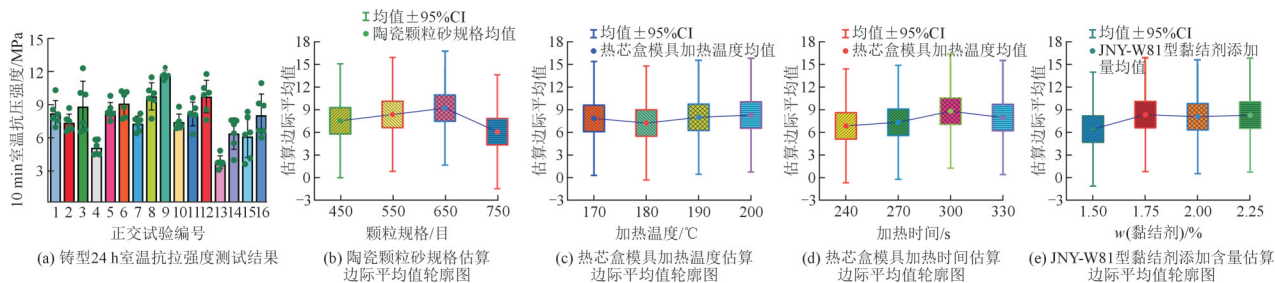


图 6 铸型 10 min 室温抗压强度测试结果和不同因素的估算边际平均值轮廓图

Fig.6 Compressive strength of mold in 24 h at room temperature and estimated marginal mean average diagrams of different factors

3 结 论

(1)单因素变量工艺性能试验测试时不同规格的陶瓷颗粒砂铸型均具有较好的室温抗拉强度,650 目规格陶瓷颗粒砂铸型 10 min 和 24 h 室温抗拉强度分别为 2.994 MPa 与 3.426 MPa;随着热芯盒模具加热温度持续增加,陶瓷颗粒砂和硅酸盐无机粘结剂铸型室温抗拉强度持续上升。热芯盒模具加热时间对铸型室温抗拉强度影响较小,铸型 10 min 即时室温抗拉强度为 2.14~2.57 MPa,铸型 24 h 室温抗拉强度分布于 2.1~2.55 MPa 之间,最佳的热芯盒模具加热时间为 240 s。随着 JNY-W81 型粘结剂添加量增加,铸型室温抗拉强度呈现出上升趋势;随着 JNY-A 型促硬剂添加量持续增加,铸型室温抗拉强度呈现出先上升后下降的变化,且当 JNY-A 型促硬剂添加量在 50%~55% 时可取得较佳的室温抗拉强度。

(2)结合 5 因素 4 水平正交试验工艺性能试验和各因素主效应检验分析,陶瓷颗粒砂规格对铸型 10 min 室温抗拉强度影响明显,显著性小于 0.05,热芯盒模具加热温度、热芯盒模具加热时间和 JNY-W81 型粘结剂添加量对铸型 10 min 室温抗拉强度影响较小,工业化批量连续生产陶瓷颗粒砂和硅酸盐无机粘结剂铸型时,应选择 450 目陶瓷颗粒砂、200 ℃热芯盒模具加热温度、300 s 热芯盒模具加热时间和 2.25% 的 JNY-W81 型粘结剂添加量,铸型 10 min 室温抗拉强度峰值可达 3.528 MPa。

(3)铸型 24 h 室温抗拉强度和 10 min 室温抗压强度各因素影响权重依次为陶瓷颗粒砂规格、JNY-W81 型粘结剂添加量、热芯盒模具加热时间和热芯盒模具加热温度,热芯盒模具理想加热时间为 300 s,JNY-W81 型粘结剂最佳添加量为 1.75%,铸型 24 h 室温抗拉强度和 10 min 室温抗压强度峰值可分别达 2.632 MPa 与 11.659 MPa。

参 考 文 献

[1] 张猛,朱世根,骆伟岚,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.

[2] 刘伟华,宋来,李英民.一种复合硬化改性无机粘结剂制备工艺的研究[J].铸造,2016,65(11):1 056-1 059.

[3] 于志勇.无机粘结剂砂在汽车铸件高效制芯工艺中的研究[D].辽宁大连:大连交通大学,2018.

[4] 忻方海,刘伟华,宋来,等.一种铸造用抗吸湿型无机粘结剂的研究[J].现代铸铁,2020,40(6):53-64.

[5] 张宏奎,刘伟华,宋来.无机冷芯盒粘结剂在汽车铸件中的应用[J].现代铸铁,2021,41(5):58-60.

[6] 张友寿,薛亦渝,黄晋,等.铝合金铸造用磷酸盐粘结剂砂的研究[J].特种铸造及有色合金,2005(8):494-495.

[7] 张友寿,黄才华,黄晋,等.改性钠磷酸盐无机树脂砂铸造粘结剂性能研究[J].特种铸造及有色合金,2006,26(6):327-329.

[8] 吴景峰,边庆月,王成刚.一种铸铁用无机粘结剂及制芯方法研究[J].铸造,2013,62(9):890-894.

[9] 李良锋,吕福特,马雪,等.固化剂对磷酸盐粘结剂固化行为的影响研究[J].人工晶体学报,2014,43(5):1 311-1 316.

[10] 石南起,张磊,赵国平,等.固化方式对磷酸盐有机/无机复合铸造粘结剂性能的影响[J].热加工工艺,2016,45(5):5-55.

[11] JENS M, HEINZ D, MARTIN O, et al. Advances in the field of inorganic binder systems[J].China Foundry, 2016, 65(5):431-435.