

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2020.10.006

# 水玻璃砂负压吹 CO<sub>2</sub> 硬化工艺研究

刘 伟<sup>1</sup>, 许荣福<sup>2</sup>, 孙清洲<sup>2</sup>, 杨明华<sup>1</sup>

(1. 凯得力耐火材料(中国)有限公司, 江苏 苏州 215600; 2. 山东建筑大学 材料科学与工程学院, 山东 济南 250101)

**摘要:** 以水玻璃砂为研究对象, 研究不同工艺条件下负压吹 CO<sub>2</sub> 硬化水玻璃砂工艺性能, 分别在不同的吹气压力、吹气时间、水玻璃加入量, 不同的试样厚度条件下, 系统研究水玻璃砂采用传统的吹气方式与负压吹气方式的硬透性、硬化均匀性、抗拉强度及表面强度等影响规律。实验结果表明: 在负压条件下, CO<sub>2</sub> 气体吹气时间为 30 s, 吹气压力为 0.20 MPa, 水玻璃加入量为 6% 时, 水玻璃砂的表面强度最高, 其最大表面硬度为 (89), 硬透性最好, 硬化均匀; 其工艺试样的抗拉强度最高 (2.73 MPa), 硬化效果最好。

**关键词:** 水玻璃砂; CO<sub>2</sub> 硬化; 硬化强度; 负压硬化工艺

中图分类号: TG242

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2020)10-0921-05

## Study on CO<sub>2</sub> Hardening Process of Sodium Silicate Sand by Negative Pressure Blowing

LIU Wei<sup>1</sup>, XU Rongfu<sup>2</sup>, SUN Qingzhou<sup>2</sup>, YANG Minghua<sup>1</sup>

(1. Calderys China Co., Ltd., Suzhou 215600, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Shandong Jianzhu University, Ji'nan 250101, China)

**Abstract:** Taking sodium silicate sand as the research object, the technological properties of CO<sub>2</sub> hardening sodium silicate sand under different technological conditions were studied. The influence laws of hard permeability, hardening uniformity, tensile strength and surface strength of sodium silicate sand using traditional and negative air blowing methods were studied under different conditions of blowing pressure, blowing time, adding amount of sodium silicate and different sample thickness. The results show that under the negative pressure condition, when the blowing time of CO<sub>2</sub> gas is 30 s, the blowing pressure is 0.20 MPa, and the amount of sodium silicate is 6%, the surface strength of sodium silicate sand is the highest, and its maximum surface hardness is (89), with the best hard permeability and uniform hardening. The highest tensile strength of process sample is 2.73 MPa and the best hardening effect.

**Key words:** sodium silicate sand; CO<sub>2</sub> hardening process; hardening strength; negative pressure hardening process

在铸钢件和大型铸铁件生产中,水玻璃砂工艺具有高温强度高、操作方便、无毒无味、成本低廉等优点而获得广泛应用。水玻璃砂是用无色、无臭、无毒、不易燃的无机水玻璃胶体作粘结剂的铸造型砂或芯砂,尤其在造型、固化和浇注过程中,无刺激性气味无有毒物释出,是一种很好的绿色化铸造型材料<sup>[1-3]</sup>。然而水玻璃砂存在清砂困难,易造成次生“粉尘污染”;旧砂再生困难,使得大量的废砂堆放造成次生“碱性污染”<sup>[4-7]</sup>。CO<sub>2</sub> 硬化水玻璃砂具有成本低、流动性好、硬化速度快、发气量低等优点,在我国铸件生产中应用较广泛。但对于普通 CO<sub>2</sub> 硬化水玻璃砂来说,吹气硬化强度低,水玻璃加入量往往高达 6%~8%,导致其型芯溃散性差,旧砂再生困

难<sup>[8]</sup>。虽然通过降低水玻璃加入量,使得有机酯水玻璃的溃散性得到一定改善,降低水玻璃粘结剂的加入量,有助于解决以上问题,清砂问题得到一定程度的缓解,但水玻璃旧砂再生回用难的问题依然存在<sup>[9]</sup>。如何解决水玻璃砂的清砂和再生这两大难题是当前很长一段时间内铸造生产者所面临的严峻挑战。

水玻璃砂硬化主要有热硬化、有机酯硬化和 CO<sub>2</sub> 气体硬化等几种方法,这几种硬化方法各有特点,如加热硬化特点是强度高,所需水玻璃量少,但其容易烘不透、易吸湿、耗能大、生产率低,尤其是对于大件更困难;有机酯是一种新型的液体硬化剂是被人们极为看好的一种硬化剂,其特点是水玻璃加入量少、溃散性得到改善,但由于其吸湿性极强、受环境影响大、硬透性差和工艺操作复杂;CO<sub>2</sub> 硬化水玻璃砂生产方便,劳动条件好,工艺过程及装备简单,成本低,尤其是硬化时间和使用时间的矛盾可以

收稿日期: 2020-06-22

作者简介: 刘 伟(1987-), 山东菏泽人, 本科, 铸造工程师。主要从事铸造技术及服务方面的工作。

电话: 13721987623, E-mail: 307696361@qq.com

很好的解决,这是目前其它任何硬化工艺无法实现的。尽管 CO<sub>2</sub> 水玻璃砂有很多优点,但在长期的生产实践中发现,CO<sub>2</sub> 硬化水玻璃砂仍有许多缺点<sup>[8]</sup>:①水玻璃加入量在 7%~8%,这将导致浇注后的试样(型)溃散性很差,清砂极其困难;②由于水玻璃加入量太多,浇注后的旧砂,再生非常困难,回用率很低;③硬化的水玻璃砂在储存过程中容易吸湿,表面产生白霜和粉化,储存稳定性有待于进一步改进;④传统的吹 CO<sub>2</sub> 硬化水玻璃砂硬透性差,硬化均一性差;⑤VRH 法对以上问题具有较大的改善,但需要一整套设备,设备资金投入大,固定尺寸的真空室不能适应过大或过小的砂箱或芯盒,强力的真空泵需要不断的维护和更新,对操作工的技术要求高,给推广带来一定困难。随着新材料、新技术、新工艺的不断出现,对水玻璃砂硬化工艺的研究与开发非常迫切。

本文在传统 CO<sub>2</sub> 硬化水玻璃砂的基础上,参考 VRH 法,提出负压吹 CO<sub>2</sub> 硬化水玻璃砂的思路,目的是解决传统吹 CO<sub>2</sub> 硬化不均匀、对大件硬透性差、旧砂溃散性及 VRH 法资金投入太大、技术要求高等缺点,从而达到提高生产率和充分发挥 CO<sub>2</sub> 水玻璃砂应用优势的目的,探索与寻找负压 CO<sub>2</sub> 硬化水玻璃砂的硬化工艺及硬化参数,为 CO<sub>2</sub> 硬化水玻璃砂的应用与发展提供理论基础。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验用材料及仪器设备

实验用原砂为河北围场砂(70/140),其性能参数如表 1;模数为 2.4、波美度 50°Be、密度为 1.55 g/cm<sup>3</sup> 的水玻璃;工业普通 CO<sub>2</sub> 气体。实验用主要仪器及设备:JD200-3G 电子天平(感量 0.001 g),秒表,S2004 高效转子混砂机,自制负压吹气装置(其原理图如图 1),自制检测均匀度装置、智能型砂强度实验仪、A 型表面硬度表、恒温恒湿箱等。

表 1 围场原砂主要性能

Tab.1 The technical performance of the new base silica sand

砂子种类	粒度分布	角形系数	耗酸值/mL	泥分含量(%)
新砂	70/140	1.09	7.23	0.35

如图 1 所示的自制负压吹气装置,是由有机玻璃制作的,主要由上下两大部分构成,上部结构主要为端盖和试样模具,下部结构主要为负压室。结合盖罩法工艺,在上部结构处接入 CO<sub>2</sub> 气源,下部结构连通负压抽气装置。

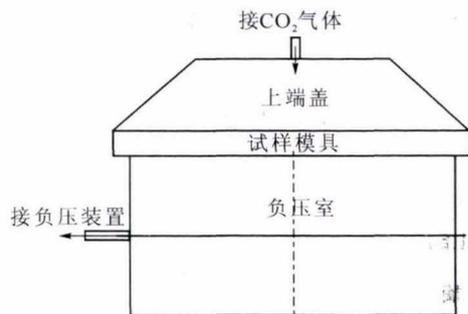


图 1 自制负压吹气装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of self-made negative pressure air blowing device

### 1.2 实验方法

本实验研究了 CO<sub>2</sub> 气体的负压吹气和常压吹气两种吹气工艺对水玻璃砂的抗拉强度及硬化均匀性的影响。抗拉强度实验的步骤如下:先称量一定量的原砂,加入混砂机中,然后加入一定比例的水玻璃粘结剂,混制 1.5 min 后出砂。混合均匀的水玻璃砂用“8”型模具手工造型,造型过程中稍微紧实,制成标准试样,然后将制好的试样连带模具直接放到吹气硬化装置中,接入 CO<sub>2</sub> 气源并启动负压抽气装置,以形成负压环境,上方在一定的压力下吹入 CO<sub>2</sub> 气体一定的时间,然后取出试样,进行初强度和终强度的抗拉强度实验。本实验所定义的初强度为试样取出后 10 min 所测的抗压强度数值,终强度为试样放置 24 h 后所测的抗拉强度数值。

为了探索 CO<sub>2</sub> 硬化水玻璃砂的硬透性,本实验设计了一个均匀性实验,具体方法如下:称量一定量的原砂,加入混砂机中,然后加入 6% 的水玻璃粘结剂,混制 1.5 min 后出砂;将混合均匀的水玻璃砂填充到带有阶梯形状模样的砂箱内(阶梯模样示意图如图 2),稍微紧实,然后放置在自制负压吹气装置中按照不同工艺进行硬化;吹气完成后检测阶梯状砂芯各个阶梯平面的表面硬度,对两种吹气方式的砂芯硬透性和硬化均一性效果进行比较。阶梯砂芯均匀性实验的测试环境温度 25 °C,湿度为 40 RH,且测试前阶梯砂芯在标准状态下放置 24 h。测试时,将试样置于平台上。调整压针头与试样表面的距离至 25.4 mm,然后,施加合适力度(不冲击被测物)使压针头压在试样上。待完全压下,与测试物接

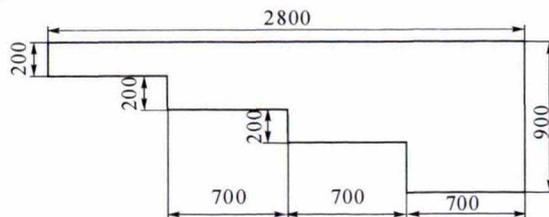


图 2 阶梯状砂芯模样

Fig.2 Pattern of the stepped sand core

触 1 s 内,立即读取刻度值数字并记录其结果。为了让数值准确,需量取 5 处且每处相距 6 mm 以上,取平均值作为表面硬度。

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 工艺性能实验

本文研究了 CO<sub>2</sub> 吹气方式、吹气时间、水玻璃加入量对 CO<sub>2</sub> 硬化水玻璃砂性能的影响,实验共分为 4 组,每组实验均采用负压和常压吹气两种吹气方式进行实验。

(1)第 1 组选定 CO<sub>2</sub> 气体的吹气压力为 0.15 MPa,水玻璃加入量为 7%,试样为标准“8”型试样,变换不同的吹气时间,观察吹气时间对水玻璃砂强度的影响现象,测试结果如图 3。

由图 3 可以看出,当吹气压力为 0.15 MPa 时,CO<sub>2</sub> 吹气时间为 40 s 时,负压吹气方式抗拉强度达到最高值 2.38 MPa;当吹气时间大于 40 s,砂芯出现过吹现象,硬度反而下降;当吹气时间小于 40 s 时吹气不足。对比两种吹气方式,相同的吹气时间初强度差距不大,但是终强度差距很大。吹气时间 40 s 左右,负压条件下的终强度明显高于常压吹气。当压力为 0.15 MPa 时,吹气时间大于 40 s,砂芯终强度逐渐下降;当常压吹气方式 100 s 时,砂芯终强度为 1.60 MPa,当大于 100 s,砂芯出现过吹现象,

说明负压减少吹气时间,减少 CO<sub>2</sub> 气体的消耗,提高试样强度,缩短工作周期,降低成本,提高劳动效率。在负压条件下,吹气 40 s 后,随着吹气时间的增加,试样的初始强度增大,而终强度逐渐降低。

(2)第二组选定 CO<sub>2</sub> 气体的吹气压力为 0.20 MPa,水玻璃加入量为 7%,试样为标准试样,变换不同的吹气时间,考察吹气时间对水玻璃砂强度的影响,实验结果如图 4。

由图 4 看出:当吹气压力为 0.20 MPa 时,负压条件下吹气时间 30 s 时,试样达到最大终强度 2.73 MPa。随着吹气时间增加,试样强度降低,砂芯出现过吹现象。相同条件下,负压吹气和常压吹气方式相比,初强度相同,终强度高,达到最大硬化时间短。提高 CO<sub>2</sub> 气体的吹气压力可以提高水玻璃砂的抗拉强度,同时可以缩短砂芯达到最高强度的吹气时间在上述两组实验的基础上,选定 CO<sub>2</sub> 气体的吹气压力为 0.20 MPa,吹气时间为 30 s,试样为标准“8”字试样,更改不同的水玻璃加入量,考察水玻璃加入量对水玻璃砂强度的影响,实验结果如表 2。

由表 2 得出:水玻璃的加入量对水玻璃砂的性能有重要的影响,随水玻璃加入量的增多两种吹气方式水玻璃砂的抗拉强度都增大。加入量为 6%时,24 h 后水玻璃砂的抗拉强度达到 2.73 MPa,常压吹气仅为 1.00 MPa,可以看出负压吹气方式提高了水

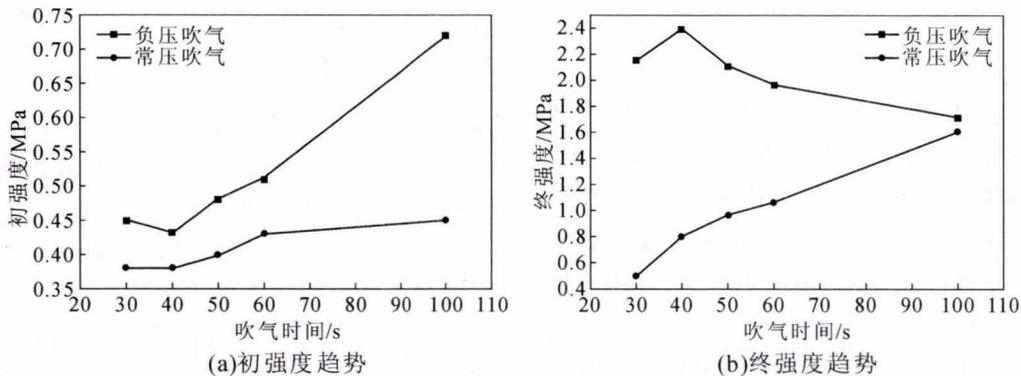


图 3 不同吹气方式对强度的影响(吹气压力 0.15 MPa)

Fig.3 Influence of different blowing methods on tensile strength (blowing pressure 0.15 MPa)

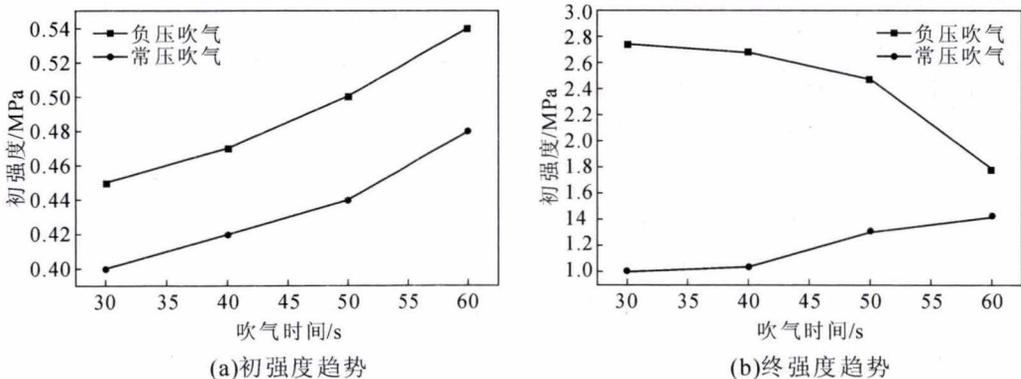


图 4 不同吹气方式对强度的影响(吹气压力 0.20 MPa)

Fig.4 Influence of different blowing methods on tensile strength (blowing pressure 0.20 MPa)

表 2 不同水玻璃加入量负压条件下对水玻璃砂抗拉强度的影响(吹气压力 0.20 MPa)

Tab.2 Influence of different amount of sodium silicate on the tensile strength of sodium silicate sand under negative pressure (blowing pressure 0.20 MPa)

水玻璃加入量(%)	负压吹气时抗拉强度 /MPa		常压吹气时抗拉强度 /MPa	
	10 min	24 h	10 min	24 h
	7	0.43	2.73	0.40
6	0.45	2.73	0.40	1.00
5	0.40	2.50	0.40	0.89

玻璃砂的利用率,降低实际生产中水玻璃的加入量。当水玻璃加入量为 5% 时,试样强度也可达到铸造生产时的硬度要求,与实际生产中加水玻璃 7%~8% 相比,改善砂芯的溃散性和旧砂回用性。

为考查不同试样厚度在负压条件下的硬化水玻璃砂的抗拉强度,选定 CO<sub>2</sub> 气体的吹气压力为 0.20 MPa,吹气时间为 30 s,水玻璃加入量为 6%,试样厚度为标准“8”字试样的一半,实验结果如表 3。

表 3 不同试样厚度负压条件下对水玻璃砂抗拉强度的影响

Tab.3 Influence of different thickness of sample on the tensile strength of sodium silicate sand under negative pressure

试样厚度	负压吹气时抗拉强度 /MPa		常压吹气时抗拉强度 /MPa	
	10 min	24 h	10 min	24 h
	标准试样	0.45	2.73	0.38
标准试样的 1/2	0.10	1.39	0	0.70

由表 3 实验结果看出:负压吹气方式,标准试样的终强度大约是 1/2 厚度标准试样终强度的 2 倍;而常压吹气方式,标准试样的终强度小于 1/2 厚度标准试样终强度的 2 倍。这可以说明在负压吹气硬化条件下,试样硬透性好,硬化更均匀;常压吹气方式硬化不充分。

总之,相同条件下负压吹气的效果比常压吹气效果好;负压吹气有助于 CO<sub>2</sub> 气体进入砂粒空隙内部,可以提高 CO<sub>2</sub> 气体的有效使用率;减少吹气时间和水玻璃加入量,有效的节约了生产成本和工作时间,提高生产效率。CO<sub>2</sub> 气体的吹气时间对试样的强度有很大的影响,过长和过短的吹气时间都得不到最好的强度。从表 5.3 可以明显地看出,CO<sub>2</sub> 气体在吹气时间 30 s,吹气压力为 0.20 MPa 时试样强度最佳,当吹气时间为 40 s 时强度较 30 s 时低,说明 40 s 时已经过吹,试样出现粉化且强度降低。从表 5.5 得出加入水玻璃量为 6% 时试样强度最高,并且满足生产要求。我们认为:负压吹气方式其硬透性及硬化均匀性好于常压吹气方式。当吹气压力为 0.20 MPa,

吹气时间为 30 s,加入水玻璃量为 6% 时,在有负压状态下,其水玻璃砂的硬化强度(2.73 MPa)最高,硬化效果最好。

## 2.2 负压吹 CO<sub>2</sub> 硬化水玻璃砂均匀性实验

用 A 型表面硬度表检测各个表面的硬度结果如表 4。

表 4 不同阶梯面表面平均硬度

Tab.4 Average hardness of different stepped sand surfaces

吹气方式	平均硬度				
	上表面	20 mm 阶梯面	40 mm 阶梯面	60 mm 阶梯面	90 mm 阶梯面
	负压吹气	89	89	89	87
常压吹气	88	87	85	82	80

由表 4 可以看出,常压吹气方式随着厚度的增加,阶梯试样的阶梯面平均硬度逐渐减小;负压吹气方式厚度增大硬度稍微降低,但是很小,随着厚度的增加,试样硬化效果很好,阶梯状试样硬化均匀,硬透性好。不同吹气方式的阶梯状试样厚度较低时硬化效果没有差别,但是随着厚度的增加,差别越来越大。试样厚度 90 mm 时常压吹气方式上下表面硬度有比较大的差距,负压吹气方式上下表面硬度差距不大。负压吹 CO<sub>2</sub> 硬化水玻璃砂可以提高试样的硬透性,以及硬化均一性。硬化效果比常压吹气好。

## 3 结论

(1) 当压力为 0.15 MPa 时,CO<sub>2</sub> 吹气时间为 40 s,负压吹气方式抗拉强度达到最高值 2.38 MPa;随着吹气时间增加或减少,砂芯强度逐渐下降;负压吹气硬化明显高于传统硬化工艺。

(2) 当压力为 0.20 MPa 时,CO<sub>2</sub> 吹气时间为 30 s,负压吹气方式抗拉强度达到最高值 2.73 MPa。

(3) 提高 CO<sub>2</sub> 气体的吹气压力可以提高水玻璃砂的抗拉强度,同时可以缩短砂芯达到最高强度的吹气时间。

(4) 随水玻璃加入量的增多水玻璃砂的抗拉强度增大;加入量为 6% 时,负压吹气方式硬化强度可满足使用要求,负压吹气方式试样硬透性好,硬化均匀。

(5) 阶梯试样的阶梯面平均硬度随试样厚度的增加而逐渐减少。这说明采用常压吹气方式,其砂芯的硬透性随着砂芯厚度的增加而降低,而负压吹气方式,其砂芯的硬透性随砂芯厚度的变化影响不明显。当吹 CO<sub>2</sub> 气体时间为 30 s,吹气压力为 0.20 MPa,加入水玻璃量为 6%。

(下转第 929 页)

表2 数据分析表  
Tab.2 Data analysis table

定位方式	参照组	实验组
d1	0.113 8	0.067 9
d2	0.132 4	-0.028 5
d3	0.122 8	-0.115 5
d4	0.134 7	-0.038 8
d5	0.107 1	0.093 5
d6	0.198 4	-0.058 7
d7	0.100 8	-0.096 8
d8	0.035 2	0.014 4
D	0.099 4	0.053 2

0.099 4 提高至 0.053 2 mm,且该方案检具制作周期短,满足个性化快速定制的需求,为后续复杂铸型高精度定位提出了一种新的实现方案。

#### 参考文献:

[1] 尚俊玲,陈伟平,李元元.中国铸造行业发展战略分析[J].铸造

技术,2007,28(10):1386-1389.

- [2] 柳百成.铸造技术与计算机模拟发展分析[J].铸造技术,2005,26(7):611-617.
- [3] 刘丰,单忠德.大型薄壁壳体件无模铸造技术研究[J].铸造技术,2013,34(10):1324-1326.
- [4] 刘丽敏,单忠德.轻型数控成形机主体结构有限元分析与优化[J].铸造,2012,69(9):1038-1042.
- [5] Li Xinya, Shan Zhongde, Liu Feng, et al. Rapid Patternless Casting Technology on CNC Manufacturing[C]/Proceedings of 69th World Foundry Congress, 2010, 10, 16-20.
- [6] 刘丽敏,单忠德.基于无模铸造精密成形技术砂型坎合组方式研究[J].铸造技术,2017,38(2):354-359.
- [7] 单忠德.中国的无模铸造[J].铸造技术,2011,32(5):760-762.
- [8] 单忠德.基于快速原型的金属模具制造工艺研究[D].北京:清华大学,2002.
- [9] 程精涛.几种快速成形方法在铸造中的应用[J].铸造技术,2015,32(5):242-244.

(上接第 915 页)

- [3] 周斌,龚家林,黄宜俊. Al-10Sr 中间合金形态对 AlSi7Mg 合金变质组织的影响[J].铸造技术,2019,40(1):43-44,48.
- [4] 于小健,吉卫喜,钱陈豪,等. Sr-Y 复合变质对 Al-7Si 合金组织和性能的影响[J].材料科学与工艺,2020.[2020-05-25 on line].
- [5] 贾锦玉,陈志强,胡文鑫,等. La 和 Y 对细化后 A356 铝合金显微组织的影响[J].稀土,2020,41(2):41-46.
- [6] Shabestari S G, Miresmaeili S M, Boutorabi S M A. Effects of Sr-modification and melt cleanliness on melt hydrogen absorption

of 319 aluminium alloy [J]. Journal of Materials Science, 2003, 38(9):1901-1907.

- [7] Liu L, Samuel A M, Samuel F H, et al. Influence of oxides on porosity formation in Sr-treated Al-Si casting alloys [J]. Journal of Materials Science, 2003, 38(6):1255-1267.
- [8] Lu S Z, Hellawell A. Growth mechanisms of silicon in Al-Si alloys [J]. Journal of Crystal Growth, 1985, 73(2):316-328.

(上接第 924 页)

#### 参考文献:

- [1] Kosuge K, Sunaga M, Goda R, et al. Cure and Collapse Mechanism of Inorganic Mold Using Spherical Artificial Sand and Water Glass Binder [J]. MATERIALS TRANSACTIONS, 2018, 59(11):1784-1790.
- [2] SONG, DU, ZHANG, et al. Parametric optimization of modifiers for ester-hardened sodium silicate bonded sand [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2020, 35(5):531-536
- [3] Ismail A A M, Kannadasan K, Pichaimani P, et al. Synthesis and characterisation of sodium silicate from spent foundry sand: Effective route for waste utilisation [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 264:121689.
- [4] 张普庆,孙清洲,赵中魁,等.含水玻璃芯砂粘土旧砂再生技术

研究[J].铸造技术,2010,31(8):1051-1053.

- [5] 王瑾,杨靖昊,赵亮.基于绿色铸造水玻璃砂再生回用技术研究[J].铸造技术,2018,39(3):533-536,542.
- [6] 吴星,欧全梅,陈勇棠.磷酸盐改性水玻璃旧砂加热-机械法再生[J].铸造技术,2016,37(5):1076-1078.
- [7] 卢记军,汪华方,周昌瑞.水玻璃旧砂湿法再生研究进展[C]//2018 中国铸造活动周论文集.中国机械工程学会、铸造行业生产力促进中心:中国机械工程学会铸造分会,2018:331-335.
- [8] 车广东,刘向东.水玻璃加入量对 VRH-CO<sub>2</sub> 法硬化水玻璃砂的影响[J].铸造技术,2014,35(02):334-336.
- [9] Wang L C, Jiang W M, Gong X L, et al. Recycling water glass from wet reclamation sewage of waste sodium silicate-bonded sand [J]. China Foundry, 2019, 16(3):198-203.