DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.10.007

基于复杂铸件无模复合成形技术高精度铸型组装控制方法研究

洪海春,杨文亮,魏宗磊,徐继福,沈　鑫,张　鹃,单宝珍
(北京机科国创轻量化科学研究院有限公司,北京 100083)

摘　要:采用复杂铸件无模复合成形技术快速制作砂型模具,通过设置3D打印检具直接控制铸型组装精度和砂型坎合结构间接控制铸型组装精度两组对比试验,研究了两种控制方式的组装精度误差。通过扫描分析研究了砂型组装后型芯的偏心距 D。结果表明,通过3D打印检具直接控制组装精度的方式,偏心距误差值最小,可获得组装精度较高的铸型。

关键词:复杂铸件无模复合成形技术;砂型模具;3D打印检具;坎合结构

中图分类号:TG242　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)10-0925-05

Research on High Precision Sand Mold Assembling Control Method on Complex Casting Patternless Forming Technology

HONG Haichun[1], YANG Wenliang[1], WEI Zonglei[1], XU Jifu[1], SHEN Xin[1], ZHANG Kun[1], SHAN Baozhen[1]
(Beijing National Innovation Institute of Lightweight Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: Manufactured sand molds with complex patternless casting. Set up two group of contrast experiments which are positioned directly by 3D printing checking gauge and indirect position structure to compare sand mold assemble positioning precision. By scanning and analysis the deviation of the sand core and mold after assemble, the results shows that the deviation by 3D printing checking gauge is the smallest among the two methods, thus is the better way to control positioning precision of sand mold.

Key words: complex casting patternless forming technology; sand mold; 3D printing checking fixture; positioning structure

在高端装备产业快速发展的今天,高端装备复杂零部件个性化定制的需求与要求都在日益提高,尤其是在铸件轻量化、绿色化、高质化[1,2]等方面。为了实现上述目标,需要精密的铸型成形方法及过程精度控制手段的支持。采用传统的有模铸造方法进行铸件的开发,需要多套模具翻模制作砂型,不但生产周期长,且翻模过程中存在精度损失,无法实现铸型的一体成形[3]。另外为了满足生产工艺的需要,需将铸型剖分为多个砂型单元,然后将各砂型单元通过坎合结构组装并获得待浇注铸型[4-6]。

本文是基于复杂铸件无模复合成形技术开展的高精度铸型组装控制方法研究,复杂铸件无模复合成形技术是在CAD模型的驱动下,直接采用数字化无模铸造精密成形机切削砂坯,经过高速的粗精加工获得可以直接进行浇注的砂型和砂芯,进而得到铸件的一种快速制造技术[7-9]。以此技术为依托,并借助3D打印技术高精快速成形的特点制备壁厚检具,通过设置3D打印检具直接控制组装精度和砂型坎合结构间接控制组装精度两组对比试验,研究两种精度控制方式的型芯组装误差,进一步提出一种高精度铸型组装的控制方法。

1　实验方案设计

本文研究的主要内容是基于复杂铸件无模复合成形技术的高精度铸型组装的控制方法。主要是通过对比现行的坎合结构间接精度控制方法与本文提出的利用3D打印检具直接控制铸型组装精度的方法进行对比,获得一种高精度壁厚的控制方案。

本文采用对比试验的方式研究两种精度控制方法获得的铸型的精度,试验模型采用桶形薄壁件,具体模型如下所示。

试验模型采用薄壁设计,壁厚分为6~13 mm 8

收稿日期:2020-07-16
基金项目:科技部国家重点研发计划:基于互联网的3D打印制造创新应用云服务平台(2016YFB1101800)
作者简介:洪海春(1988-),蒙古族,内蒙古通辽人,学士,工程师.主要从事无模快速成形技术方面的工作.
电话:18811228132,E-mail:honghc025@163.com

个厚度，按照图 1(b)中的浇注工艺设计进行模具分型，获得产品的 3D 铸型模型，铸型尺寸为 420 mm×420 mm×370 mm，其结构如图 2 所示。



(a)试验模型　(b)浇注工艺设计剖视图

图 1 试验模型设计

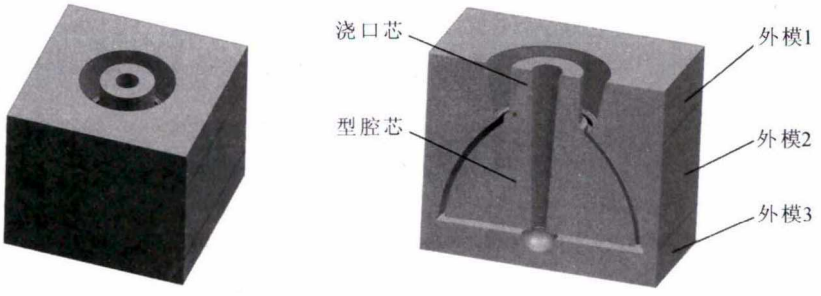
Fig.1 Experimental model design

1.1 实验组砂型定位结构设计

实验组砂型定位结构采用 3D 打印检具直接定位，型腔芯与外模 3 直接通过坎合结构定位如图 3(右)所示，而直接决定产品壁厚的外模 2 与型腔芯之间则通过 3D 打印快速制作的检具直接定位保证产品的壁厚精度，其定位原理如图 3(左)所示。首先在外模 3 与外模 2 之间设置预定位销孔结构，以保证外模 2 与外模 3 的粗定位。而外模 3 与外模 2 之间的定位销孔结构定位间隙为 1.5 mm，外模 3 与外模 2 之间无法形成精定位，然后通过预先设置在型腔芯上的 3D 打印检具进一步调整外模 2 与型腔芯之间的相对位置，以起到直接控制壁厚的效果。

1.2 对照组砂型定位结构设计

对照组采用传统的坎合结构定位，见图 4。其中外模 2 与型腔芯之间的定位通过外模 2 与外模 3 之间的定位结构 1 和外模 3 与型腔芯之间的定位结构 2 间接保证，其中为了便于装配，定位结构 1 与定位结构 2 之间的配合面均需保留 0.3 mm 的装配间隙，以便于装配。



(a)3D铸型模型　(b)浇注工艺设计剖视图

图 2 铸型三维设计

Fig.2 3D mold design

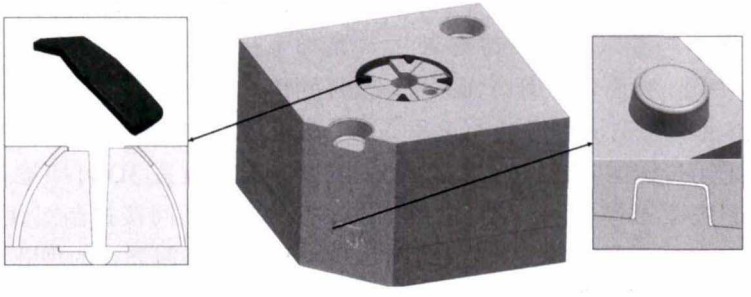
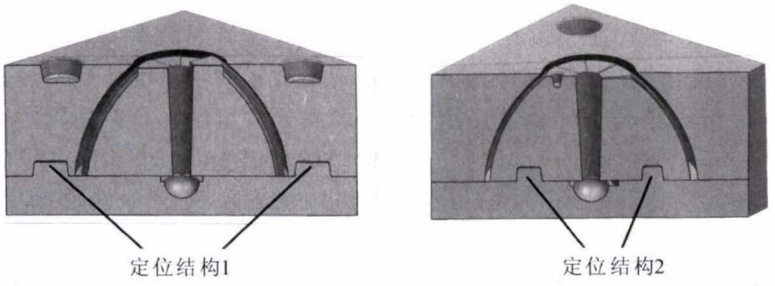


图 3 3D 打印检具直接定位原理图

Fig.3 Schematic principle of direct positioning by 3D printing gauge



(a)外模2、3定位原理图　(b)外模3与型腔芯定位原理图

图 4 对照组定位原理图

Fig.4 Schematic positioning principle of contract group

2　实验过程

2.1　砂型的制作

本研究采用数字化无模铸造精密成形机进行砂型的制作，设备的成形精度为±0.1 mm/1 000 mm，砂坯采用 70~140 目酚脲脘树脂砂，分别制作实验组与对比组两组砂型，制备完成的砂型如图 5。

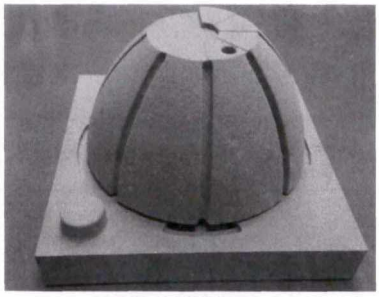


图 5 砂型
Fig.5 Sand mold

2.2　3D 打印检具的制作

本研究采用 3D 打印的方式直接制作壁厚控制检具，该方案制作周期短，检具精度高，可达到±0.02 mm，制作完成的检具如图 6 所示。

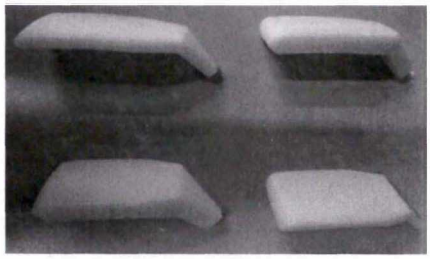
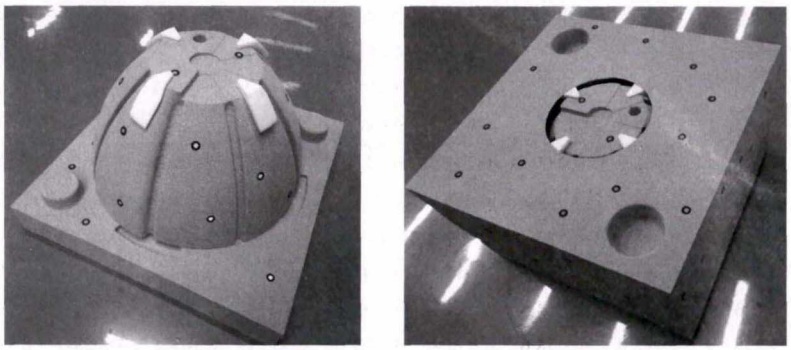


图 6 3D 打印检具
Fig.6 3D printing gauge

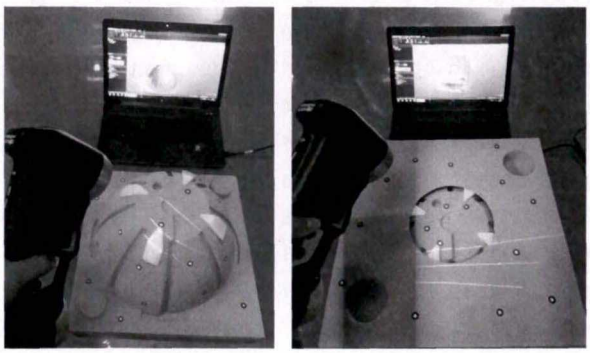
2.3　砂型装配及扫描分析

分别对实验组和对照组两组砂型进行装配及扫描的工作，分析装配完毕后铸件型腔壁厚的精度偏差，砂型组装及扫描分析过程分别如图 7、图 8。



(a)型腔芯组装　　(b)外模2组装

图 7 砂型装配过程图
Fig.7 The process of sand mold assembly



(a)型腔芯扫描　　(b)整体扫描

图 8 砂型扫描过程图
Fig.8 Scanning process of sand core and mold

3　结果分析

3.1　结果分析方案设计

利用 Geomagic Control 软件对扫描结果进行分析，分别提取壁厚不等的 8 段边缘数据的误差值，每段边缘扫描数据内外侧分别对应提取 7 个特征点，其中不同壁厚区域编号及特定点提取方案及编号方案的示意图如图 9 所示，其中内腔芯的型面特征点的编号为 a_{i1}-a_{i7}，其中 i 为壁厚区域编号，外模型面特征点的编号为 b_{i1}-b_{i7}，其中 i 为壁厚区域编号。利用偏心距表征两种不同定位方式的定位误差。

每段壁厚区域因定位精度造成的误差为 d_i。

$$d_i=\sum_{i=1}^{8}[(b_{i1}-a_{i1})+(b_{i2}-a_{i2})+(b_{i3}-a_{i3})+(b_{i4}-a_{i4})+(b_{i5}-a_{i5})+(b_{i6}-a_{i6})+(b_{i7}-a_{i7})]/8 \quad (1)$$

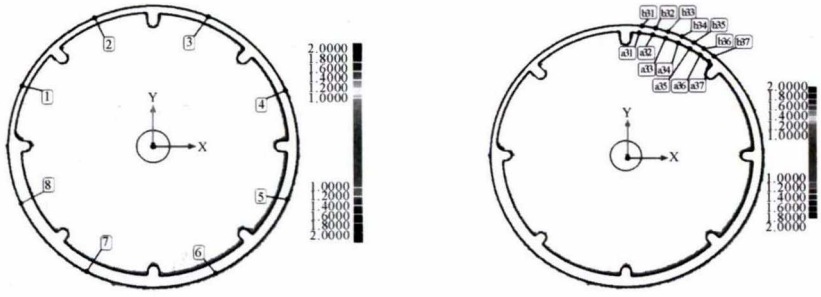
将对边 d_i 相减，求出 4 个方向上两种不同定位方式分别造成的定位误差，取 4 个值中绝对值最大的值定义为偏心距 D，则偏心距 D 的计算公式如公式(2)所示：

$$D=\mathrm{MAX}[\,|d_1-d_5|,|d_2-d_6|,|d_3-d_7|,|d_4-d_8|\,] \quad (2)$$

3.2　数据处理

对扫描结果按照上述方案提取特征参数，结果如表 1。

按照公式 1 及公式 2 将上述实验数据进行统计分析，计算结果如表 2。



(a)壁厚区域编号　　(b)特征点提取及编号方案

图 9 模型分析方案示意图

Fig.9 Schematic of sand mold analysis scheme

表 1 特征参数统计表

Tab.1 characteristic parameters statistical table

定位方式	序号	1			2			3			4		
		b	a	d	b	a	d	b	a	d	b	a	d
参照组坎合结构定位	1	-0.013 3	-0.153 8	0.140 5	0.061 2	-0.111 6	0.172 8	0.015 9	-0.116 2	0.132 1	-0.160 9	-0.265 3	0.158 4
	2	-0.036 9	-0.155 8	0.118 9	0.110 3	-0.033 7	0.144 0	0.069 4	-0.104 6	0.174 0	-0.094 9	-0.244 0	0.149 1
	3	-0.002 9	-0.162 5	0.159 6	0.121 1	-0.090 5	0.211 6	0.003 1	-0.109 8	0.112 9	-0.053 8	-0.216 9	0.163 1
	4	-0.013 8	-0.104 3	0.090 5	0.099 0	-0.041 6	0.140 6	-0.033 3	-0.104 7	0.071 4	-0.186 0	-0.312 7	0.126 7
	5	-0.044 4	-0.120 9	0.076 5	0.051 2	-0.030 6	0.081 8	-0.033 3	-0.147 2	0.113 9	-0.204 0	-0.282 1	0.078 1
	6	-0.005 9	-0.063 1	0.057 2	0.029 2	-0.062 1	0.091 3	-0.046 3	-0.183 3	0.137 0	-0.165 6	-0.302 2	0.136 6
	7	-0.041 4	-0.112 2	0.153 6	0.025 7	-0.059 2	0.084 9	-0.090 3	-0.208 5	0.118 2	-0.197 6	-0.328 3	0.130 7
实验组3D打印检具定位	1	-0.214 5	-0.385 4	0.060 9	-0.082 8	-0.155 6	0.072 8	-0.003 5	0.107 8	-0.111 3	0.117 0	0.143 6	-0.026 6
	2	-0.276 5	-0.369 7	0.093 2	-0.081 4	-0.082 9	0.001 5	0.041 8	0.155 0	-0.113 2	0.172 8	0.190 1	-0.017 3
	3	-0.219 0	-0.281 0	0.062 0	-0.083 2	-0.107 2	0.024 0	0.010 7	0.162 4	-0.151 7	0.129 7	0.222 6	-0.092 9
	4	-0.247 7	-0.309 1	0.061 4	-0.054 1	-0.013 1	-0.041 0	0.059 1	0.139 2	-0.080 1	0.101 2	0.176 2	-0.075 0
	5	-0.178 3	-0.237 6	0.059 3	-0.014 6	0.027 1	-0.041 7	-0.025 0	0.134 9	-0.159 9	0.123 9	0.134 4	-0.010 5
	6	-0.221 1	-0.233 9	0.012 8	-0.058 6	0.050 4	-0.109 0	0.065 1	0.188 4	-0.123 3	0.110 6	0.163 9	-0.053 3
	7	-0.099 1	-0.225 1	0.126 0	-0.062 4	0.043 6	-0.106 0	0.118 9	0.188 0	-0.069 1	0.099 9	0.095 8	0.004 1

定位方式	序号	5			6			7			8		
		b	a	d	b	a	d	b	a	d	b	a	d
参照组坎合结构定位	1	-0.296 7	-0.367 1	0.070 4	-0.261 8	-0.449 2	0.187 4	-0.277 3	-0.379 3	0.102 0	-0.202 0	-0.248 4	0.046 4
	2	-0.271 6	-0.345 9	0.074 3	-0.252 1	-0.523 7	0.271 6	-0.230 4	-0.297 7	0.067 3	-0.140 1	-0.186 1	0.046 0
	3	-0.227 8	-0.399 6	0.171 8	-0.244 4	-0.466 0	0.221 6	-0.234 9	-0.320 3	0.085 4	-0.112 9	-0.211 5	0.098 6
	4	-0.367 1	-0.332 6	-0.034 5	-0.240 4	-0.478 8	0.238 4	-0.189 7	-0.286 2	0.096 5	-0.144 2	-0.163 3	0.019 1
	5	-0.287 2	-0.417 6	0.130 4	-0.257 9	-0.407 4	0.149 5	-0.206 5	-0.306 1	0.099 6	-0.147 4	-0.184 9	0.037 5
	6	-0.266 6	-0.404 2	0.137 6	-0.207 1	-0.419 3	0.212 2	-0.144 6	-0.322 4	0.177 8	-0.153 1	-0.124 8	-0.028 3
	7	-0.290 0	-0.489 8	0.199 8	-0.234 6	-0.342 5	0.107 9	-0.177 8	-0.255 1	0.077 3	-0.088 6	-0.115 9	0.027 3
实验组3D打印检具定位	1	0.066 6	0.013 6	0.053 0	-0.232 3	-0.170 3	-0.062 0	-0.482 3	-0.414 7	-0.067 6	-0.457 8	-0.482 7	0.024 9
	2	0.091 9	0.007 9	0.084 0	-0.213 1	-0.170 4	-0.042 7	-0.566 7	-0.402 2	-0.164 5	-0.486 3	-0.047 3	-0.013 3
	3	0.070 7	-0.049 7	0.120 4	-0.244 7	-0.190 2	-0.054 5	-0.491 3	-0.398 5	-0.092 8	-0.465 3	-0.478 3	0.013 0
	4	0.071 3	-0.051 1	0.122 4	-0.263 4	-0.266 8	0.003 4	-0.504 0	-0.417 8	-0.086 2	-0.444 3	-0.491 5	0.047 2
	5	-0.011 6	-0.137 9	0.126 3	-0.314 5	-0.215 2	-0.099 3	-0.502 7	-0.411 5	-0.091 2	-0.424 2	-0.438 2	0.014 0
	6	-0.003 4	-0.155 9	0.159 3	-0.325 3	-0.281 8	-0.043 5	-0.477 1	-0.417 4	-0.059 7	-0.432 3	-0.386 8	-0.045 5
	7	-0.138 1	-0.127 2	-0.010 9	-0.426 5	-0.314 3	-0.112 2	-0.546 8	-0.431 1	-0.115 7	-0.348 5	-0.408 9	0.060 4

注：表 1 种 a 表示内腔芯型面；b 表示外模型面；d 表示因定位精度造成的误差

由表 2 的数据看出，采用 3D 打印检具的方式，型芯的定位精度有明显的提高，就本案例而言，定位精度由 0.099 4 提高至 0.053 2 mm，定位精度得到较大改善。

4 结论

相比于传统的坎合结构定位而言，采用 3D 打印检具直接定位的方式，铸型的定位精度有较为明显的改善，以本次实验产品为例，产品定位精度可由

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 of69th 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装方式研究[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-CO2 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.