

# 大型铸钢件 3D 砂型打印用原砂研究及应用

苏志东, 冯周荣, 李彩虹, 赵建东

(共享铸钢有限公司, 宁夏银川 750021)

**摘要:** 研究了大型铸钢件用不同类型原砂、粘结剂对3D砂型打印砂芯质量的影响和不同型砂及粘结剂的砂型在锆英粉涂料保护下对铸件表面质量的影响。同时还通过MAGMA模拟软件分析了不同型砂对于铸件冒口收缩形态的影响, 并综合原砂成本等因素给出了大型铸钢件使用3D砂型打印技术的原砂选择试验路线及选择依据, 为大型铸钢件应用3D砂型打印技术奠定了型砂方面的研究基础。

**关键词:** 大型铸钢件; 3D打印; 硅砂; 陶粒砂; 呋喃树脂; 酚醛树脂

增材制造技术, 即采用材料逐渐累加的方法制造实体零件, 其综合了计算机图形处理、数字化信息控制、激光技术、机电技术和材料技术等多项高技术优势, 可以用来改善产品制造环节, 大幅缩短研发和生产过程。在众多3D打印技术之中, 三维印刷技术(简称3DP技术)具有成形速度快、成形材料价格低等特点, 且成形过程不需要支撑, 多余粉末材料去除方便, 特别适合于制做内腔复杂的原型, 最适于与铸造工艺相结合, 实现产业化应用<sup>[1-2]</sup>。

目前的3D砂型打印技术主要应用于铸铁、铸铝或相对低熔点的金属铸造, 对于铸钢的应用还处于探索阶段, 该技术在大型铸钢件上的应用鲜有报道。而铸钢件相对铸铁件工艺复杂, 浇注温度高, 对原砂、树脂及涂料有更高的要求。因此本文通过研究大型铸钢件的原砂、树脂固化剂配合相应的涂料以解决大型铸钢件应用3D砂型打印技术面临的粘砂问题, 同时研究原砂对于铸钢件收缩的影响。

## 1 原砂对大型铸钢件质量及3D打印砂型砂芯的影响分析

通常型砂是由原砂(山砂或河砂)、粘结剂按照一定比例混合而成。最常用的铸造砂是硅砂, 硅砂的高温性能不能满足使用要求时则使用锆英砂、铬铁矿砂、刚玉砂等特种砂。为使制成的砂型和型芯具有一定的强度, 在搬运、合型及浇注液态金属时不致变形或损坏, 一般要加入型砂粘结剂, 将松散的砂粒粘结起来成为型砂。铸钢件因其浇注温度相对较高, 尤其大型铸钢件浇注时因钢液体积大会产生较大的热容量, 因此其对型砂质量要求更高<sup>[3]</sup>。

一般用于大型铸钢件3D砂型打印原砂有硅砂( $\text{SiO}_2$ 含量 $\geq 95\%$ )和陶粒砂<sup>[4]</sup>。原砂对于大型铸钢件的影响主要在于其耐火度的不同会影响铸件的粘砂情况, 因其导热系数和蓄热能力的差异会影响铸件凝固时温度场的分布, 进而影响到冒口的补缩, 同时因其高温强度的差异也会影响到铸件的整体尺寸。

另外, 因原砂类型带来的角形系数和酸耗值的差异, 配合不同的粘结剂会影响到3D砂型打印砂芯的打印密度和表面紧实度, 需要从打印机的打印层厚、振动频率、分辨率等参数去调整, 以确保打印砂芯的强度和表面质量<sup>[5]</sup>。

本文研究呋喃树脂或热酚醛树脂加入固化剂配合陶粒砂或硅砂研究其高温抗烧结能力、打印质量及根据其热物性参数对铸件凝固收缩的影响。使用的粘结剂参数如表1所示。

作者简介:

苏志东(1990-), 男, 高级工程师, 主要从事大型铸钢件工艺及铸造先进技术研发。E-mail: don0208@163.com

中图分类号: TG221

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2021)

10-1178-05

收稿日期:

2021-09-05。

表1 呋喃树脂及热酚醛树脂相关参数  
Table 1 Parameters of furan resin and phenolic resin

项目	25 °C粘度 /(mPa·s)	20 °C密度 /(g·ml <sup>-1</sup> )	pH	发气量 /(g·ml <sup>-1</sup> )	常温抗拉 强度/MPa	常温抗压 强度/MPa	1 000 °C高温残留 抗压强度/MPa	硬化成形 方式	粘结剂 加入量/%
呋喃树脂	10~14	1.1~1.25	5.5~6.5	12~15	1.2~1.5	6.0~8.0	0.6~0.8	常温自硬	0.5~0.8
热酚醛树脂	8~14	0.87~0.93	6.0~7.0	7~10	1.2~1.7	4.3~5.5	1.4~1.6	微波加热硬化	0.8~1.0

## 2 不同原砂、粘结剂的3D打印砂芯质量

本试验使用共享集团自主研发的铸造砂型3D打印机-AJD 2200A打印 $\Phi 50$  mm  $\times$  50 mm抗压试块及标准“8”字形抗拉试块,采用粒度为50~100目的陶粒砂或硅砂或其一定比例混合砂,其中硅砂的SiO<sub>2</sub>含量在98%以上(为了提高原砂耐火度,选择SiO<sub>2</sub>含量更高的硅砂用于试验,下称高硅砂),其成本约为陶粒砂的1/3,粘结剂为呋喃树脂或热酚醛树脂。通过调整打印层厚、分辨率、振动频率等参数,得到了各类型砂的3D打印砂型的成形性、密度、表面紧实度、抗压强度及抗拉强度,如表2所示。

从表2中可以看出,3D打印呋喃树脂砂具有较好的打印成形性,而3D热酚醛树脂砂因其需要加热固化,在加热的过程中砂芯表面因为热量集中易出现发酥现象,所以导致砂型表面紧实度低。另外,热酚醛高硅

砂因其角形系数大,型砂之间粘结性好,比较致密,加热固化时粘结剂微量发气会导致部分部位出现气孔,进而影响表面质量。

## 3 原砂高温烧结试验

选取3D砂型打印常用的陶粒砂及硅砂,在实验室进行烧结试验,其试验设计如表3所示,其中型砂粒度为50~100目,硅砂依然选用SiO<sub>2</sub>含量 $\geq 98\%$ 的高硅砂。本试验主要是验证原砂的抗烧结能力,因此只选择高硅砂。将一组高硅砂和陶粒砂按不同比例加入粘结剂和固化剂固化后的试样在马弗炉中加热相同的时间,取出后观察试样被硬物划拨后的状态。

本试验制作5组 $\Phi 50$  mm  $\times$  50 mm标准试样,在马弗炉中加热至1 600 °C保持10 min,然后随炉冷却后取出,分析不同试样的烧结状况。试验结果分别如图1和图2所示。

表2 不同类型砂、粘结剂打印砂芯的成形性及相关参数

Table 2 Formability and interrelating parameters of sand cores made by 3D printing with different foundry sand and binders

3D打印型砂种类	成形性	表面紧实度	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
呋喃陶粒砂	好	80	1.50	6~8	1.2~1.4
呋喃高硅砂	好	80	1.42	6~7	1.4~1.6
热酚醛陶粒砂	局部发酥	67	1.51	4.4~5.0	1.3~1.7
热酚醛高硅砂	易形成气孔	72	1.44	4.4~5.0	1.3~1.7
热酚醛混合砂(70%硅砂+30%陶粒砂)	好	75	1.47	4.4~5.0	1.3~1.7

表3 原砂烧结试样编号

Table 3 Sample number for raw sand sintering test

试样编号	1	2	3	4	5
原砂类型	100%高硅砂	100%陶粒砂	50%高硅砂+50%陶粒砂	30%高硅砂+70%陶粒砂	70%高硅砂+30%陶粒砂



图1 试样1 600 °C保持10 min并随炉冷却取出后的情况(按试验编号从左至右排列)

Fig. 1 Conditions of sintered samples after being heated to 1 600 °C and kept for 10 min then being cooled in the furnace



图2 试样1 600 °C灼烧10 min后随炉冷却取出用硬物划拨之后的情况(按试验编号从左至右排列)

Fig. 2 Scratched conditions of sintered samples after being heated to 1 600 °C and kept for 10 min then being cooled in the furnace

从图2可以看出, 2号试样保持得最为完整, 其次是4号试样、3号试样、5号试样、1号试样。通过试样被划过后的形态可以看出, 不同原砂的抗烧结能力依次为: 100%高硅砂 > 70%高硅砂+30%陶粒砂 > 50%高硅砂+50%陶粒砂 > 30%高硅砂+70%陶粒砂 > 100%陶粒砂, 可见随着有陶粒砂的加入会部分烧结, 但不完全溃散。这说明在1 600 °C的高温环境下, 陶粒砂的抗烧结能力要低于高硅砂, 单从抗烧结能力来看, 高硅砂更加适合于大型铸钢件用原砂。

## 4 高温浇注试验

### 4.1 高温浇注后不同种类型砂的抗烧结能力

设计一组板状试块, 其轮廓尺寸为500 mm × 300 mm × 100 mm, 使用3D打印机打印出砂芯, 粘结剂为3D打印用呋喃树脂, 涂料使用厚度约1.0~1.2 mm的锆英粉涂料。使用ZG15Cr2Mo1材质的钢液进行浇注, 浇注温度约1 560~1 580 °C, 打箱后观察铸件的表面质量状况, 具体试验设计如表4。

打箱后铸件表面如图3所示, 从图中可以看出, 使用四种不同类型原砂的铸件打箱后表面均没有出现粘

砂情况, 其中使用100%陶粒砂的铸件表面型砂及涂料层的剥落性要好于使用100%高硅砂的剥落性。从图中还可以看出, 随着陶粒砂的加入比例减少, 铸件表面型砂及涂料的剥落性也相应变差。

### 4.2 不同类型树脂作粘结剂的硅砂在浇注后的抗烧结能力

考虑到陶粒砂及高硅砂在1.0~1.2 mm的锆英粉涂料涂层保护下铸件表面质量都可接受, 本次设计试验对于高硅砂用不同类型粘结剂并加入固化剂固化后再次进行高温浇注试验。考虑到试验开展的便捷性及成本, 在某铸件厚大部位带出图4所示吊耳, 其尺寸为Φ140 mm × 300 mm, 按表5中试验方案验证硅砂使用不同类型粘结剂及涂料方案对于大型铸钢件表面质量的影响。

从图4中铸件的表面形态可以看出, 2号铸件表面几乎没有树脂砂烧结粘砂, 只有圆角部位有少部分烧结粘砂, 而1号铸件表面则有局部树脂砂烧结粘砂, 可见2号铸件的砂型表面抗烧结能力要好于1号铸件。同样4号铸件砂型表面的烧结情况要好于3号铸件, 而1号

表4 试板高温浇注试验设计  
Table 4 High temperature pouring experiment design of test blocks

项目	1	2	3	4
原砂类型	100%陶粒砂	50%陶粒砂+50%高硅砂	30%陶粒砂+70%高硅砂	100%高硅砂
涂料	使用锆英粉涂料, 厚度约1.0~1.2 mm			

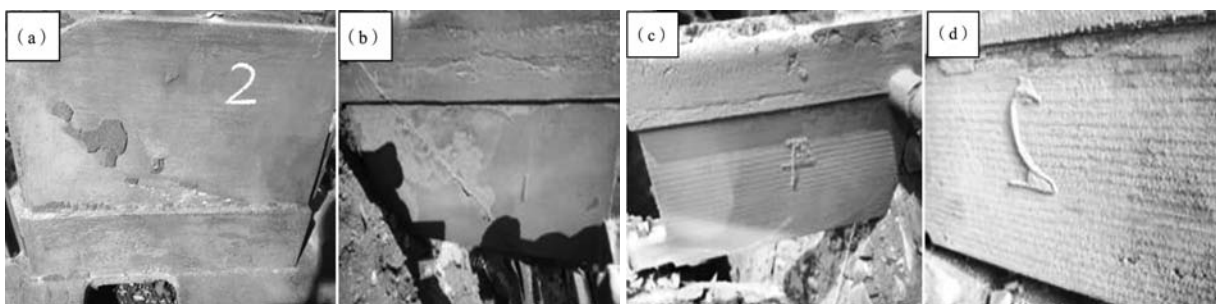


图3 使用不同类型原砂的铸件打箱后的表面粘砂情况  
Fig. 3 Surface burning-on conditions of castings after shakeout produced with different types of molding sand

表5 高硅砂用不同类型粘结剂及涂料方案的高温浇注试验方案  
Table 5 High temperature pouring experiment schemes with high silica sand bonded by different binders and coated by different thicknesses of coatings

项目	试验方案编号			
	1	2	3	4
型砂类型	呋喃+高硅砂	呋喃+高硅砂	酚醛+高硅砂	酚醛+高硅砂
涂料施涂方式	喷涂	喷涂	喷涂	喷涂
涂料厚度/mm	1	1.5	1	1.5

铸件和3号铸件之间、2号铸件和4号铸件之间则没有明显差异。从这一吊耳基础试验到铸件整体试验可以得出,高硅砂配合使用涂层1.5 mm厚的锆英粉涂料具有较好的耐高温抗烧结能力,而高硅砂使用呋喃树脂或热酚醛树脂作粘结剂,其抗烧结能力差异不明显。

## 5 数值模拟对比

### 5.1 不同型砂的热导率对比

采用MAGMA模拟软件对陶粒砂和高硅砂的热导率进行了模拟,结果如图5所示。

根据MAGMA模拟软件提供的两种砂子的热导率可以看出,在相同温度条件下,陶粒砂的热导率明显小于高硅砂,这说明陶粒砂的蓄热能力较硅砂好。

### 5.2 不同类型型砂对铸件冒口收缩形态的影响

试验设计同样尺寸的方墩子(600 mm × 600 mm × 600 mm),根据模数法计算设计合适的冒口,选用试

样材质为GS20Mn5,使用不同的型砂,利用MAGMA软件进行模拟试验,其他条件一样,从而对比陶粒砂和高硅砂对铸件冒口收缩形态的影响。其模拟结果如图6所示。

通过图6可以看出,砂型为陶粒砂的铸件冒口收缩深度明显大于高硅砂的,这表明陶粒砂的蓄热能力确实较高硅砂强,从而延长了铸件和冒口的凝固时间,因此同样的冒口在使用陶粒砂时,则收缩的更深。

## 6 结论

(1) 在没有涂料层的保护下,高硅砂的抗烧结能力要高于陶粒砂,随着高硅砂中陶粒砂加入的比例逐渐增大,其抗烧结能力逐步下降。

(2) 在1.2~1.5 mm厚锆英粉涂料层的保护下,高硅砂/陶粒砂+呋喃树脂/酚醛树脂的型砂其粘砂倾向都比较小,但使用陶粒砂面砂时,它和涂料层的剥落性要好于高硅砂。

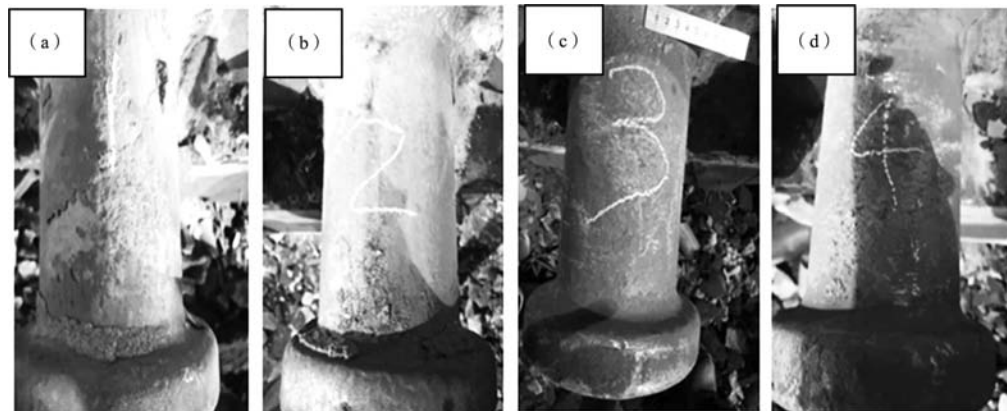
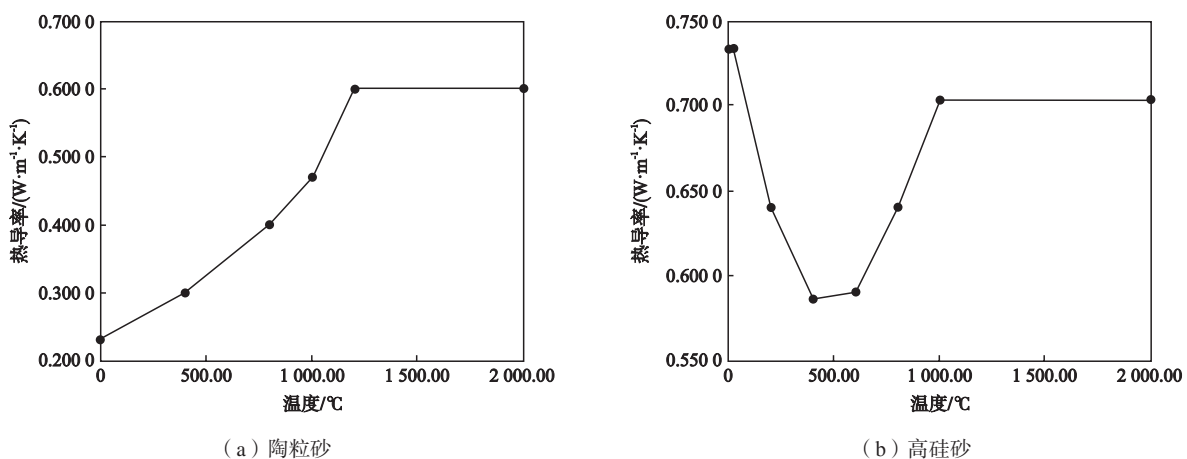


图4 高硅砂用不同类型粘结剂及涂料方案所生产铸件打箱后的表面烧结情况

Fig. 4 Surface burning-on conditions of castings produced with different types of binders and coating solutions for high silica sand after shakeout



(a) 陶粒砂

(b) 高硅砂

图5 陶粒砂和高硅砂的热导率对比

Fig. 5 Comparison on thermal conductivities of silica sand and ceramsite sand

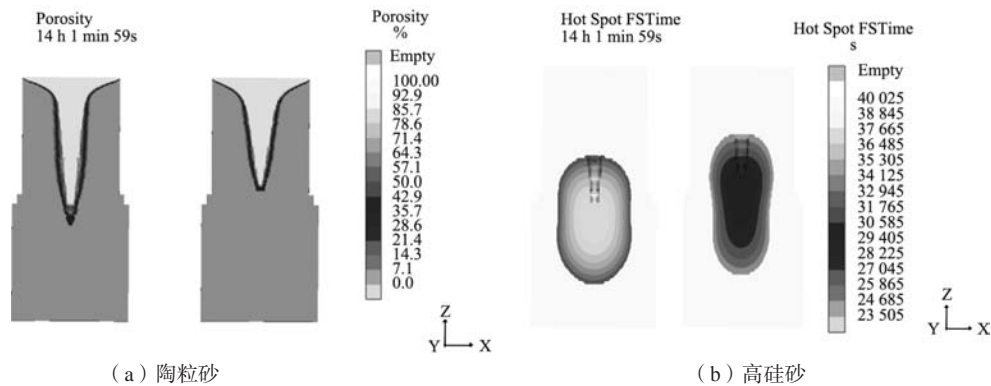


图6 使用陶粒砂和高硅砂方锭的冒口收缩模拟情况

Fig. 6 Simulation results of shrinkage conditions for risers of cubic ingot castings with silica sand and ceramsite sand

(3) 因导热率的差异, 相对于高硅砂, 使用陶粒砂会延长铸件的凝固时间, 导致冒口收缩相对较深。

(4) 高硅砂和陶粒砂两者之间在涂料层的保护下

耐高温能力差异不大, 考虑到高硅砂的吨成本是陶粒砂的1/3左右, 且高硅砂具有较好的打印成形性, 高硅砂作为大型铸钢件用原砂具有较好的应用潜力。

#### 参考文献:

- [1] 王君衡, 张全艺, 周荣光. 铸造砂型3D打印技术应用及选型分析 [J]. 铸造技术, 2020 (7): 660-663.
- [2] 何捷军, 杨建国, 赵龙. 铸造砂型3D打印技术应用及展望 [J]. 中国铸造装备与技术, 56 (3): 8-11.
- [3] 陈战考, 李秋书, 周少鹏. 高性能人造球形砂的开发与应用 [J]. 铸造, 2013 (2): 124-127.
- [4] 杨小平, 郭永斌, 刘轶, 等. 陶粒砂与硅砂在3D打印砂型中的性能对比研究 [J]. 现代铸铁, 2019, 39 (4): 46-48.
- [5] 唐贤其. 碱酚醛树脂砂工艺用原砂的选择及质量控制 [J]. 中国重型装备, 2017 (2): 41-43.

## Research and Application of Raw Sand in 3D Sand Printing for Large Steel Castings

SU Zhi-dong, FENG Zhou-rong, LI Cai-hong, ZHAO Jian-dong  
(Kocel Steel Foundry Co., Ltd., Yinchuan 750021, Ningxia, China)

#### Abstract:

In this paper, the influence of different types of raw sand and binders on the quality of 3D sand printed cores for large steel castings, and the influence of sand molds prepared with different types of raw sand and binders and coated with zircon powder coating on the surface quality of castings were studied. Meanwhile, with the simulation software of MAGMA, the influence of molding sand on the shrinkage of casting risers was analyzed, and based on the comprehensive considerations of the cost and casting quality, the experiment schemes and selection criteria of raw sand for 3D sand printing to produce large steel castings were proposed. This paper laid a foundation for basic research of molding sand used in 3D sand printing technology for large steel castings.

#### Key words:

large steel casting; 3D sand printing; silica sand; ceramsite sand; furan resin; phenolic resin