

3D 打印砂型的滚压紧实方法的探究

李景明, 陈 瑞, 宋照伟, 高云保, 熊云龙, 赵 岭, 张海军

(沈阳铸造研究所有限公司, 辽宁沈阳 110022)

摘要: 针对砂型3D打印无法采用紧实方法, 只能通过添加粘结剂的方法增加强度, 粘结剂加入量大, 导致砂型发气量大, 强度低的问题, 提出在3D打印过程中增加一种新的工艺方法滚压紧实工艺。本文对滚压紧实基本原理进行了阐述, 并对其进行了试验探究, 分析了滚压过程各项因素的变化对砂型强度、透气性及紧实率的影响。研究表明: 滚压紧实可以提升砂型强度, 当滚压层层厚越小, 滚压压下量越大, 砂型强度越高; 滚压速度越小, 砂型强度越高; 而滚压辊直径的大小对滚压砂型的各项性能基本没有影响。研究结果有望为进一步拓展3D打印砂型的应用提供了一定数据支撑。

关键词: 3D打印; 滚压紧实; 砂型强度; 砂型透气性

3D打印技术起源于20世纪80年代的美国^[1], 经过几十年的发展, 3D打印技术在汽车、能源、医疗、航空航天等领域均有广泛的应用^[2]。传统铸造行业砂型铸造约占60%, 其中制作砂芯、砂型的过程被公认为是一个工作强度大^[3]、劳动环境最为恶劣的环节, 砂型3D打印技术由于具有不会出现传统造型时产生的扬尘的现象, 有害物质的排放量低, 生产环境好^[4]; 省去了制作模具的环节, 在节约生产成本的同时, 还为产品成形过程中的创新提升了速度与灵活性; 大幅提高了产品尺寸精度, 保证产品加工面在设计时留有较小的加工余量, 为后续产品加工提升效率; 摆脱了传统砂型生产对产品尺寸形状的约束, 保障了产品设计的灵活性^[5]等优势, 正逐步取代传统手工造型的环节。

砂型紧实成形原理的发展可以分为三个阶段。第一阶段(1960年以前): 这一阶段是以机械力学原理为主的紧砂方法, 也即传统的压实、震击、抛砂, 以及利用气体力学的吹、射砂紧实方法。第二阶段(1960年到1970年): 这一阶段的主要特点有两方面: 一方面是将第一阶段的四种传统紧砂方法的综合应用, 产生了如双面型板脱箱压实造型机, 垂直分型射挤压造型机, 多触头微震压实造型等高效率造型机, 另一方面是化学原理在造型中的应用, 如热固性树脂砂和冷硬树脂砂的应用。此外, 出现了利用物理电磁吸引原理的磁丸造型。第三阶段(1970年以后): 这个阶段特点是利用各种气体力学的造型方法的出现, 如气流脉冲造型、静压造型、真空压实造型、真空密封造型、以及在冷硬树脂砂中应用的吸压造型、喷射造型等。此外, 利用水在0℃时结冰的性质发展起来的冷冻造型。

虽然3D打印砂型制造技术已经广泛应用于铸造砂型的生产上, 但3D打印生产铸件用铸造砂型无法采用传统紧实方法, 只能通过增加粘结剂的方法增大砂型强度, 为解决3D打印砂型紧实度不足的问题, 在3D打印过程中增加了一种新的工艺方法——滚压紧实工艺(图1)。本文对滚压紧实基本原理进行了阐述, 并对其在3D打印中的应用进行了仿真模拟试验, 比较了滚压后砂型各个位置砂型强度、透气性的不同, 并总结出了规律, 为滚压紧实工艺在3D打印过程中的应用进行初步探索。

1 滚压紧实的基本原理

滚压加工在传统意义上是指通过高硬度且光滑的金属滚柱与所加工的物体表面

作者简介:

李景明(1995-), 男, 硕士, 主要研究方向为砂型3D打印。E-mail: jingming_li1111@163.com

通讯作者:

陈瑞, 男, 研究员, 博士生导师。电话: 13332430936

中图分类号: TG242

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2021)12-1430-06

基金项目:

联合基金项目(U1808216)。

收稿日期:

2021-06-01 收到初稿,

2021-09-17 收到修订稿。

滚压接触，使其表面处发生局部微量的塑性变形。如同大家经常看到铺设道路时，轧路机将凹凸不平的马路压得很平整，滚压紧实砂型的原理也是如此，用滚压辊滚压砂型表面，使砂粒产生移动，砂粒间缝隙变小（图2）。同时将砂型高度压下少许，并将凸起部分碾平，而使凹陷部分隆起，加工成平滑的表面，为下一层砂的铺设做好准备。

与传统砂型紧实方法不同的是：在滚压紧实过程中，由于分层式紧实，实际上砂型紧实过程中砂型变化量很小，对下一层尺寸精度没有影响。具体如图3所示，在滚压时只影响了上表面（图3c虚线区域），在铺设下一层砂时已将缺陷处修复。滚压时，滚压时间需要小于砂型固化时间，以避免将已硬化的砂型表面破坏。

2 滚压紧实试验准备与方案

2.1 试验准备

由于在3D打印机中进行滚压试验需要进行设备改装、系统调试极难实现，因此本试验采取手工模仿砂型3D打印的方式进行试验。

为模仿3D打印铸造砂型增材制造的特点，设计了一种可控升降平台（图4），以控制每层铺砂的厚度以

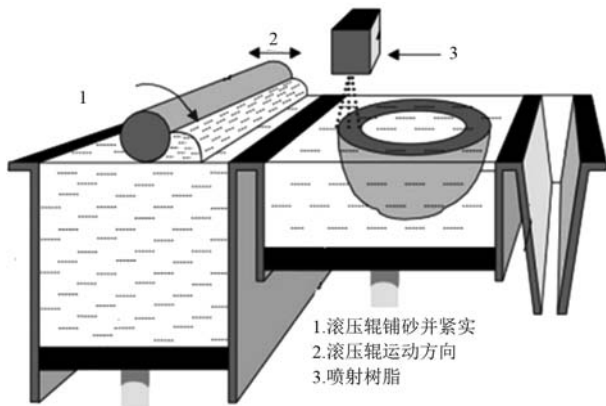
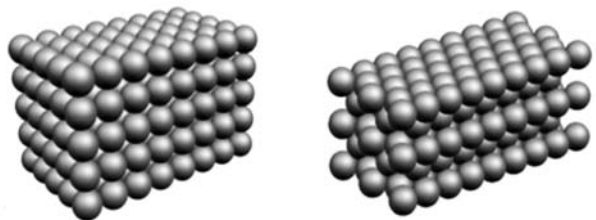


图1 砂型3D打印滚压紧实示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the sand mold 3D printing rolling compaction



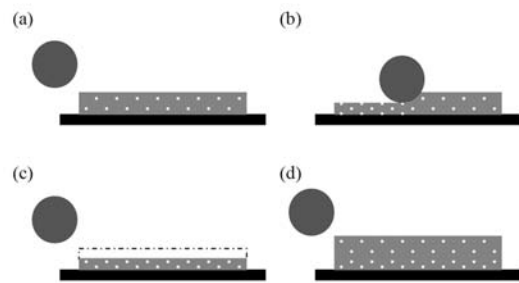
(a) 滚压前砂粒排布方式 (b) 滚压后砂粒排布方式

图2 滚压前后砂粒排布方式示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the arrangement of sand before and after rolling

及滚压时的压下量，用滚压方式对每层型砂进行物理压实，增加砂型的紧实度，进而提高砂型强度。

试验采用50~100目普通工业用硅砂，以呋喃树脂为粘结剂，粘结剂加入量为1.5%。固化剂加入量是粘结剂的14%，试验过程中滚压时砂型表面未发生硬化，调节不同层厚、不同压下量，制成200 mm × 200 mm × 200 mm的正方体试样（图5），模仿3D砂型打印过程，用普通树脂砂进行试验，试验过程如图6所示，先将平台下降型砂理论上需要铺设的厚度，把砂粒均匀的铺满装置下降部分的空间，将平台再次上升一定的高度进行滚动压实，再次下降重复过程（这部分为滚压时的压下量 h ，下降的厚度与上升高度的差值为滚压时的滚压层厚 x ）。采取正交试验的方法，改变有关工艺参数，研究影响滚压紧实的因素，总结有关规律。



(a) 铺好砂层准备滚压；(b) 进行滚压试验；
(c) 滚压一层后留下空隙（虚线区域）；(d) 进行下一层喷砂

图3 分层滚压紧实示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the layered rolling compaction

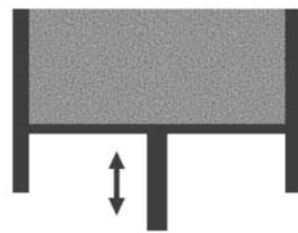


图4 滚压装置升降平台示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the lifting platform of the rolling device



图5 滚压试块

Fig. 5 Test block after rolling

2.2 试验方案

在滚压过程中，我们认为滚压层厚、压下量、滚压辊直径、滚压辊边界线速度、滚压次数是影响滚压过程的几项关键因素（图7）。通过控制变量法，改变其中一项因素，检测其中性能变化，并与未进行紧实的试样进行比较。图中： v 为滚压辊边界线速度（m/s）， r 为滚压辊半径（mm）， h 为滚压压下量（mm）。

试验过程中分别改变滚压层厚、滚压压下量、滚压辊直径、滚压辊边界线速度，以及滚压次数。

3 试验结果

用数字化无模铸造精密成形机将滚压后的200 mm × 200 mm × 200 mm的试块加工成所需的试样（图8），并进行检测。

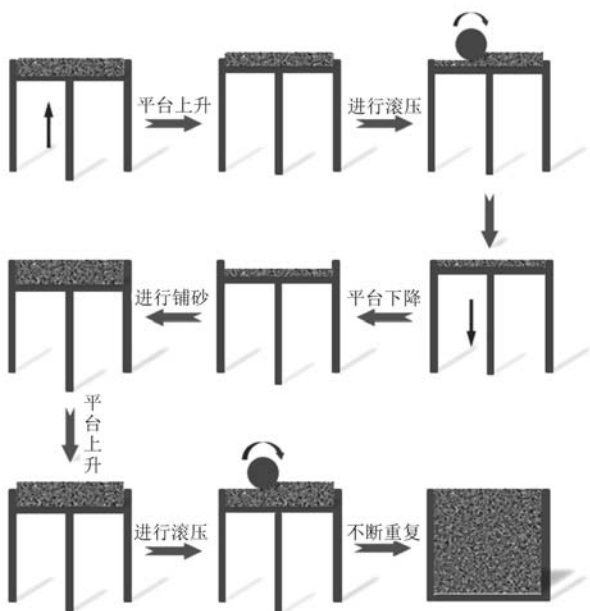


图6 试验流程示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the experimental process

3.1 滚压层厚对砂型性能的影响

图9为压下量为2.5 mm，滚压辊直径为40 mm，滚压辊边界线速度为0.2 m/s，滚压一次，层厚分别为2.5 mm、5 mm、7.5 mm、10 mm、12.5 mm制作试块的试验结果。从图9中可以看出，在其他影响因素不变的情况下，滚压层厚越小，其抗拉、抗弯、抗压强度越好，紧实率越高，透气性相对降低，但相比之下差别不大。随着层厚的逐渐减小，虽然砂型的各项强度有所提升，但是存在无法将型砂完全压进砂型之中，出现了型砂浪费的现象。从图中可以看出，在层厚为2.5 mm、5 mm两个试块中，各项性能并无很大的差距。在滚压层厚为5 mm时，抗弯强度较未紧实砂型提升了50.1%，抗拉强度提升了84%，抗压强度提升了190%，透气性下降了约69.2%。将未经过紧实的试样数据忽略，对其余数据进行数据拟合，可得出滚压层厚变化与强度的计算公式：

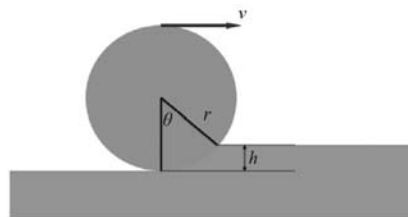
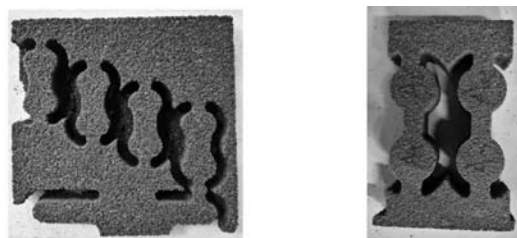


图7 滚压紧实各种参数示意图

Fig. 7 Schematic diagram of various parameters of the rolling compaction



(a) 抗拉、抗弯检测试样

(b) 抗压、透气性检测试样

图8 检测试样

Fig. 8 Test sample

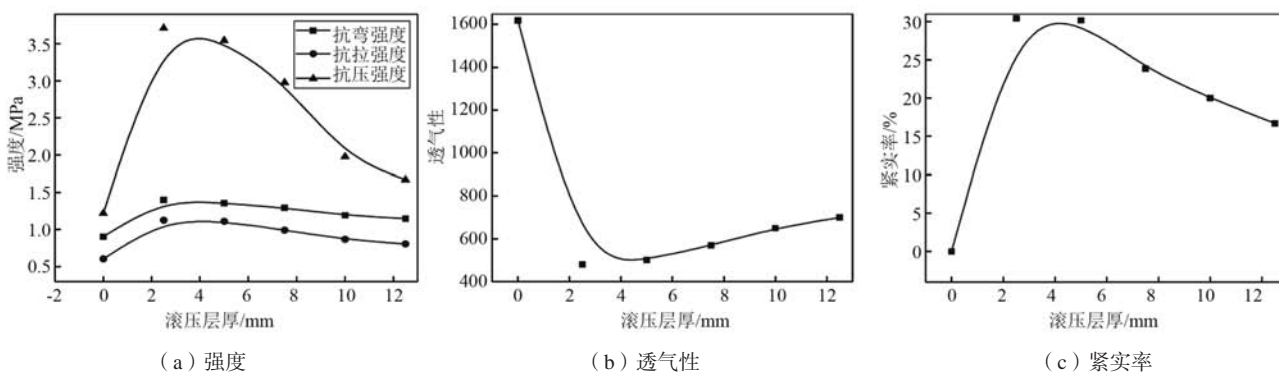


图9 滚压层厚变化对砂型性能的影响

Fig. 9 The effect of the thickness change of the rolled layer on the performance of the sand mold

$$\text{抗弯强度: } \sigma_{\tau}=0.004x^3-0.0096x^2+0.0399x+1.3532 \quad (1)$$

$$\text{抗拉强度: } \sigma_b=0.0009x^3-0.0212x^2+0.1127x+0.965 \quad (2)$$

$$\text{抗压强度: } \sigma_{bc}=0.0058x^3-0.1394x^2+0.7563x+2.5828 \quad (3)$$

在对压层厚变化对普通生产用砂型强度影响的计算公式进行分析时,对上述公式进行求导,分析变化速率可得:

$$\frac{d\sigma_{\tau}}{dx}=0.0012x^2-0.0192x+0.0399 \quad (4)$$

$$\frac{d\sigma_b}{dx}=0.0027x^2-0.0424x+0.1127 \quad (5)$$

$$\frac{d\sigma_{bc}}{dx}=0.0174x^2-0.2788x+0.7563 \quad (6)$$

可以看出,在一定范围内,随着滚压层厚的变大,砂型强度逐渐减小,但减小的速度却越来越慢。由此可见,当滚压层厚达到某一点时,砂型强度将达到最低点。因此,在滚压试验中,在保证速度的情况下,为保证砂型强度,滚压层厚尽可能的小一些。

3.2 滚压压下量变化对砂型性能的影响

图10为层厚为2.5 mm,滚压辊直径为40 mm,滚压辊边界线速度为0.2 m/s,滚压一次,令压下量分别为0.5 mm、1 mm、1.5 mm、2 mm、2.5 mm的方式制作试块检测结果。从图10中可以看出,相同压下量下,滚压压下量越大,其抗拉、抗弯、抗压强度越好,紧实率越高,透气性相对降低,但相比之下差别不大;从图中可以看出,在压下量为2.5 mm、2 mm两个试块中,各项性能并无很大的差距。在滚压层厚为2 mm时,抗弯强度提升了51.2%,抗拉强度提升了80%,抗压强度提升了182%,透气性下降了约69.1%。

将未经过紧实的试样数据忽略,对其余数据进行数据拟合,可得出下面滚压压下量变化与强度的计算公式:

$$\text{抗弯强度: } \sigma_{\tau}=-0.012h^3+0.0289h^2+0.0399h+1.3532 \quad (7)$$

$$\text{抗拉强度: } \sigma_{\tau}=-0.0273h^3+0.0941h^2+0.0859h+0.965 \quad (8)$$

$$\text{抗压强度: } \sigma_{\tau}=-0.1867h^3+0.5686h^2+0.731h+1.25 \quad (9)$$

在对压层厚变化对普通生产用砂型性能影响的计算公式进行分析时,对上述公式进行求导,分析变化速率可得:

$$\frac{d\sigma_{\tau}}{dh}=-0.036h^2+0.0578h+0.0399 \quad (10)$$

$$\frac{d\sigma_b}{dh}=-0.0819h^2+1.1372h+0.859 \quad (11)$$

$$\frac{d\sigma_{bc}}{dh}=-0.5601h^2+1.1372h+0.73 \quad (12)$$

可以看出,在一定范围内,随着滚压压下量的变大,砂型强度逐渐增加,但增加的速度却越来越慢。由此可见,在其他条件一定时,当滚压压下量达到某一点时,砂型强度将达到最高点。但一味的增加滚压时的压下量,则会造成砂型变形严重,存在部分砂子没有被滚压进砂型中,在多次试验过程中,滚压压下量应小于砂型层厚的40%。在保证砂子能完全滚压进砂型中前提下,滚压压下量尽可能的大一些。

3.3 滚压辊直径变化对砂型性能的影响

图11为层厚为2.5 mm,压下量为2.5 mm,滚压辊边界线速度为0.2 m/s,滚压一次,令滚压辊直径分别为40 mm、80 mm、120 mm、160 mm、200 mm的方式制作试块检测结果。图中可以看出,滚压辊直径的大小对滚压砂型的各项性能基本没有影响或者说影响不大。抗弯强度提升了56.0%,抗拉强度提升了72.7%,抗压强度提升了221%,透气性下降了约70.1%。

3.4 滚压速度变化对砂型性能的影响

令层厚为2.5 mm,压下量为2.5 mm,滚压辊直径

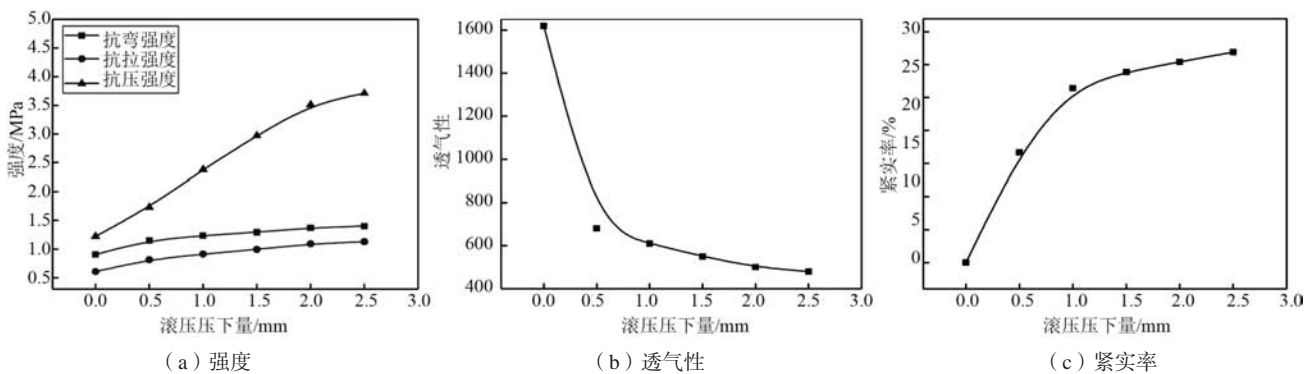


图10 滚压压下量变化对砂型性能的影响

Fig. 10 The influence of the change of rolling reduction on the performance of the sand mold

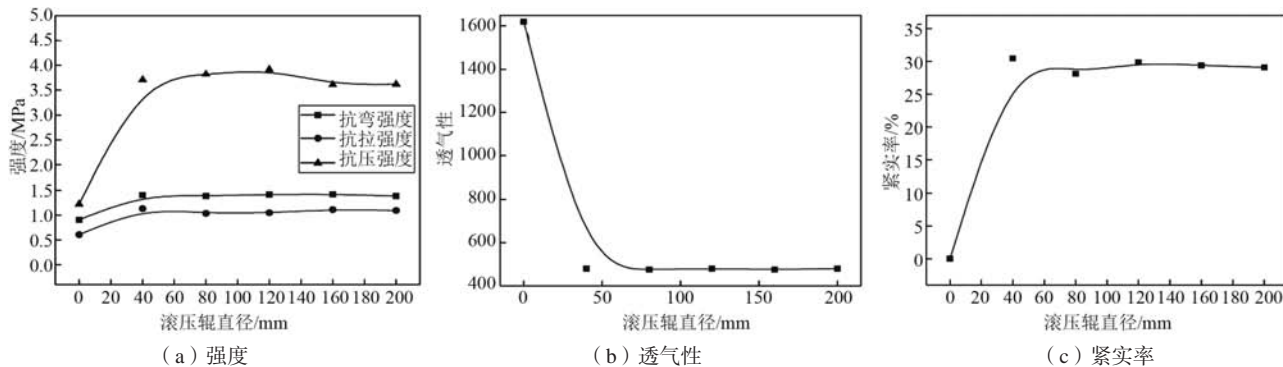


图11 滚压辊直径变化对砂型性能的影响

Fig. 11 The influence of roll diameter changes on the performance of the sand mold

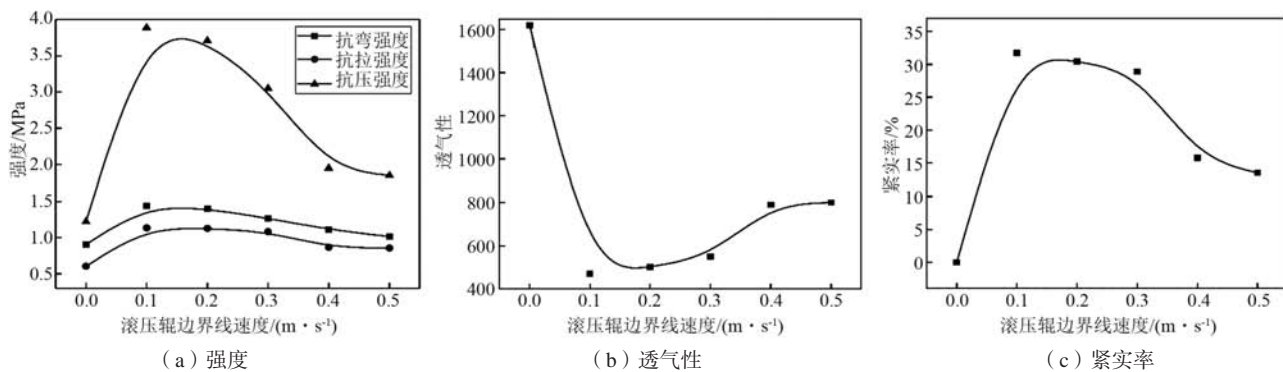


图12 滚压速度变化对普通生产用砂型性能的影响

Fig. 12 The effect of rolling speed changes on the performance of the ordinary production sand mold

为40 mm，滚压一次，调节滚压辊边界线速度分别为0.1 m/s、0.2 m/s、0.3 m/s、0.4 m/s、0.5 m/s，制作试块并进行检测，结果如图12所示。

从图12中可以看出，其他条件相同时，当滚压速度越小，砂型的抗拉、抗弯、抗压强度越好，紧实率越高，透气性相对降低，但相比之下差别不大。从图中可以看出，在滚压辊边界线速度为0.1 m/s、0.2 m/s两个试块中，各项性能并无很大的差距。在速度从0.3 m/s到0.4 m/s时，各项性能指标存在一个突变，经过分析可以得出，随着滚压辊边界线速度的逐渐增加，砂型滚压

时间过短，这时滚压辊起到了刮砂板的作用，没有将压下量部位的散砂滚压进砂型内部，而是将其直接刮走，紧实效果很不理想。但如果速度过慢，虽然能提升滚压后的砂型强度，但使强度提升效果并不明显，还会造成滚压时间过长，这样在实际生产中效率将大幅降低，综合考虑滚压速度以0.2 m/s为宜。在滚压辊边界线速度为0.2 m/s时，抗弯强度提升了58.7%，抗拉强度提升了87.2%，抗压强度提升了219%，透气性下降了约71.0%。由于存在未能完全滚压的现象无法进行数据拟合。

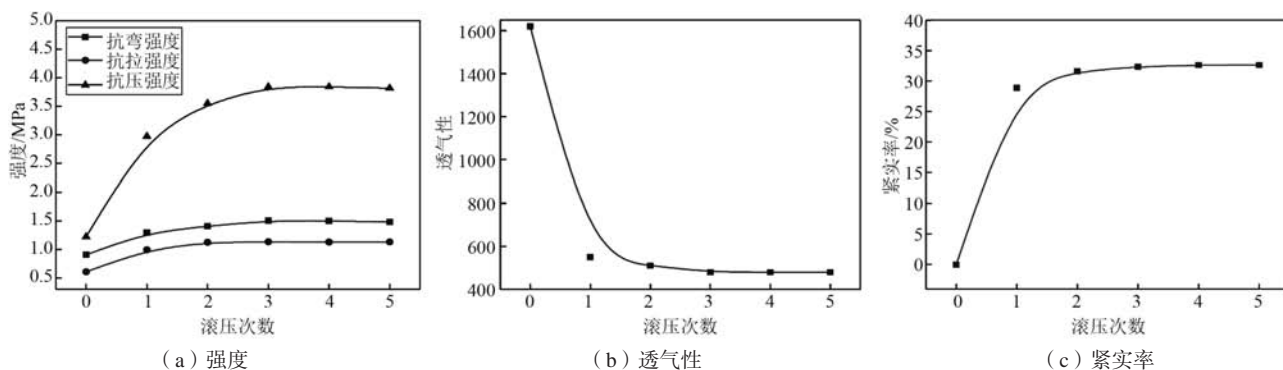


图13 滚压次数变化对普通生产用砂型性能的影响

Fig. 13 The effect of the change of the number of rolling on the performance of the ordinary production sand mold

3.5 滚压次数变化对砂型性能的影响

令层厚为2.5 mm，压下量为2.5 mm，滚压辊直径为40 mm，滚压辊边界线速度为0.2 m/s，分别滚压1、2、3、4、5次。对比不同滚压次数与未滚压（即滚压次数为零）结果如图13。

从图13中可以看出，其他条件相同时，滚压次数越多，砂型的抗拉、抗弯、抗压强度越好，紧实率越高，透气性相对降低，各项性能相比之前差别不大。从图中可以看出，在滚压次数为1、2、3三个试块中，各项性能有一定的差距，但差距基本可以忽略。从图中可以看出，在滚压次数为4、5两个试块中，各项性能已经与滚压次数为3的试块持平。从生产效率与操作难度上考虑，滚压一次最为合适。在滚压次数为1时，抗弯强度较未滚压时提升了61.3%，抗拉强度提升了90.5%，抗压强度提升了214.6%，透气性下降了约70.1%。

参考文献:

- [1] 尚红标, 王跃, 刘旭飞, 等. 缸体铸件砂型的3D打印快速成型技术及应用 [J]. 现代铸铁, 2018 (1): 40-41.
- [2] 白嘉远. 铸型的3D打印技术及应用 [J]. 科技创新导报, 2017, 14 (30): 80-82.
- [3] 吕三雷, 孔软芹, 许广涛, 等. 基于快速成形技术的树脂砂型快速铸造 [J]. 特种铸造及有色合金, 2014 (5): 513-515.
- [4] 李玲, 尹绍奎, 谭锐, 等. 铸钢件3D打印砂型芯用水基涂料的开发与应用 [J]. 铸造, 2019, 68 (4): 359-363.
- [5] 李杰, 沈其文, 余立华, 等. 选择性激光烧结宝珠覆膜砂的固化特性研究 [J]. 热加工工艺, 2013, 42 (11): 21-23.

4 结论

(1) 滚压紧实可以提升砂型强度，当滚压层层厚度越小，滚压压下量越大，砂型的抗拉、抗弯、抗压强度越好，紧实率越高，透气性相对降低，但相比强度提升透气性下降不大。在多次试验过程中，滚压压下量应小于砂型层厚的40%。不同粒度砂子比例不同，可以完全将压下部分滚压进砂型的最大值为最优的滚压压下量。

(2) 在满足一定速度要求的前提下，滚压速度越小，砂型的抗拉、抗弯、抗压强度越好，紧实率越高，透气性相对降低，但相比强度提升透气性下降不大。

(3) 滚压辊直径的大小对滚压砂型的各项性能基本没有影响。滚压次数越多，砂型的抗拉、抗弯、抗压强度越好，紧实率越高，透气性相对降低，但滚压次数超过两次后，各项性能相比之前差别不大。

Exploration of Rolling Compaction Methods for 3D Printing Sand Mold

LI Jing-ming, CHEN Rui, SONG Zhao-wei, GAO Yun-bao, XIONG Yun-long, ZHAO Ling, ZHANG Hai-jun
(Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., Shenyang 110022, Liaoning, China)

Abstract:

In view of the fact that 3D printing of sand mold cannot use the compacting method, the strength can only be increased by adding a binder. The large amount of binder added leads to the large amount of gas and low strength of the sand mold. It is proposed to add a new rolling compaction type during the 3D process. This paper expounded the basic principle of the rolling compaction, and conducted experimental exploration on it, analyzed the influence of the changes of various factors in the rolling process on the strength, air permeability and compaction rate of the sand mold. The results show that the rolling compaction can increase the strength of the sand mold. The smaller the layer thickness, the greater the rolling reduction, and the better the strength of the sand mold; the lower the rolling speed, the better the strength of the sand mold; the diameter of the rolling roller has basically no effect on the performance of the rolling sand mold. The results will provide a data foundation for further application of the 3D printing sand mold.

Key words:

3D printing; rolling compaction; sand mold strength; sand mold air permeability