

doi: 10.3969/j.issn.2095-0411.2023.06.010

3D 打印混凝土骨料铺洒漏斗的防堵塞设计

吕奇峰, 吴 恒, 戴鹏飞

(常州大学 城市建设学院, 江苏 常州 213164)

摘要: 在使用骨料床 3D 打印混凝土过程中, 为防止骨料铺洒漏斗堵塞, 文章采用离散元计算程序 EDEM 研究了骨料在漏斗中的运动和堵塞规律。计算考虑了圆台 (CTC)、正棱台 (FSP)、斜棱台 (FOP) 3 种不同形状的漏斗, 并以骨料尺寸、骨料数目和漏斗高度为计算变量, 得到 81 组不同的计算结果。结果显示, 在相同漏斗特征尺寸下, 斜棱台和正棱台漏斗容积相同, 但比圆台漏斗容积大。在铺洒骨料时, 圆台漏斗堵塞概率最大, 正棱台漏斗次之, 斜棱台漏斗最小。相比骨料数目和漏斗高度, 骨料尺寸对漏斗的堵塞影响较大。针对上述结果, 文章设计了防堵塞的斜棱台漏斗, 该漏斗在侧壁上增加了往复运动的扰动球, 设计成本较低, 且能有效防止铺洒骨料的漏斗出现堵塞现象。

关键词: 3D 打印; 混凝土; 骨料; 漏斗; 堵塞

中图分类号: TU 528.59

文献标志码: A

文章编号: 2095-0411(2023)06-0073-09

Anti-jamming design of aggregate-spreading hopper used in 3D concrete printing

LYU Qifeng, WU Heng, DAI Pengfei

(School of Urban Construction, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: In the aggregate-bed 3D concrete printing, to avoid the jamming effect happened in the aggregate-spreading hopper, the motion and jamming of the aggregates in hopper was researched in this work by using the EDEM code based on the discrete element method. Three types of hoppers, circular truncated cone (CTC), frustum of square pyramid (FSP) and frustum of oblique pyramid (FOP), were considered in the calculation. And the aggregate size, aggregate quantity and hopper height were the calculation variables. In all, 81 groups of data were obtained. Results revealed that the FSP and FOP hoppers had the same volume which was greater than that of CTC hopper with the same feature size. During spreading aggregates, the jammed probability of the CTC hopper was the highest, the FSP hopper was the second and the FOP hopper showed the lowest jammed probability. In addition,

收稿日期: 2023-06-26。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51908075)。

作者简介: 吕奇峰(1986—), 男, 河北邢台人, 博士, 讲师。E-mail: lqf@cczu.edu.cn

引用本文: 吕奇峰, 吴恒, 戴鹏飞. 3D 打印混凝土骨料铺洒漏斗的防堵塞设计[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2023, 35(6): 73-81.

the aggregate size affected the jamming more than the aggregate quantity and hopper height did. Based on the findings, an anti-jamming FOP hopper was designed in this work. On the side wall of the designed hopper, an excitation ball with reciprocal motion was set. Such design had lower cost but would effectively prevent the jamming appeared in the hopper during the aggregate spreading.

Key words: 3D printing; concrete; aggregate; hopper; jamming

混凝土 3D 打印是近年来发展较为迅速的一个技术^[1-3]。目前来看,虽然有部分研究尝试采用挤出式 3D 打印机直接打印含有粗骨料的混凝土^[4-6],但由于粗骨料降低了混凝土的打印性^[7],使得打印的构件形状和质量难以控制,故现在的挤出式 3D 打印混凝土主要还是采用没有粗骨料的砂浆材料^[8-9]。然而,近期发展起来的骨料床 3D 打印 (Aggregate-bed 3D printing) 混凝土^[1,10]为粗骨料的进一步应用提供了可能,如文献 [11] 发现了一种 3D 打印透水混凝土,是骨料床 3D 打印混凝土的具体应用案例。该透水混凝土采用层状结构,结合砂浆 3D 打印机和骨料床打印机理,逐层打印而得,其结构和打印过程如图 1 所示。和其他骨料床 3D 打印混凝土一样^[10],在打印过程中,骨料铺洒漏斗可提高打印自动化的程度和打印质量,然而,由于骨料等颗粒材料的堵塞效应 (Jamming effect)^[12-13],普通骨料铺洒漏斗十分容易出现堵塞^[14],进而降低 3D 打印的连续性和打印质量。为解决该问题,需对骨料在漏斗中的运动进行研究。

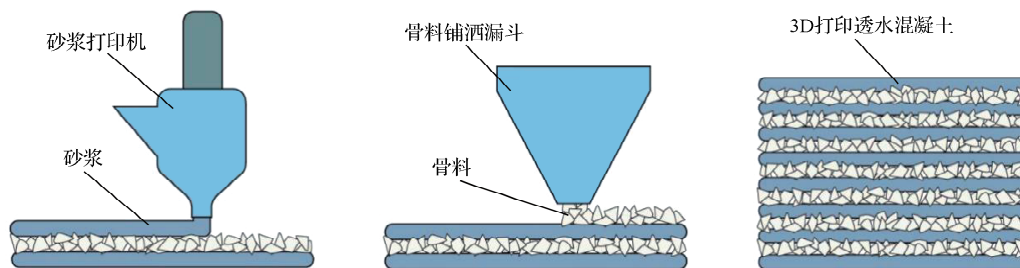


图 1 骨料铺洒漏斗在 3D 打印透水混凝土中的应用^[11]

Fig.1 Application of the aggregate-spreading hopper in the 3D printing of pervious concrete^[11]

骨料在漏斗中的运动是颗粒流的研究热点^[15],而颗粒流容易出现成拱 (Arching)^[16]和分层 (Stratification)^[17]现象,前者是造成漏斗堵塞的主要原因^[15]。在相关研究中,实验观测^[16,18]和数值计算^[19-21]是主要方法。但实验观测很难分析颗粒流动的细节机理^[22],故较多学者采用数值计算进行相关漏斗颗粒流的研究,这其中大部分是以离散元方法为基础^[19-21],少部分以有限元方法进行快速计算和整体计算^[23]。另外,还有部分研究考虑了流体作用下固体颗粒的运动,这方面通常借助有限元^[24]或格子玻尔兹曼方法^[25]来模拟流体运动,而颗粒运动还是以离散元的方法计算。从研究内容来看,漏斗尺寸^[18,25-26]、侧壁形状^[16,23]、力学性质^[23]、颗粒尺寸^[27]和形状^[19]及其分布^[24]都是研究重点。研究得到的相关结论为:曲线侧壁降低漏斗的堵塞概率^[16];非球形颗粒易堵塞漏斗^[19];大颗粒、小尺寸漏斗易堵塞^[27]。但目前还未见针对骨料床 3D 打印中的骨料铺洒漏斗的相关研究。

针对上述问题,拟采用数值计算方法研究骨料在不同形状漏斗中的运动,然后通过设置不同计算变量,进行计算和分析,统计漏斗堵塞比例,最后归纳总结漏斗的堵塞规律。此外,根据总结的规律,设计了一种防堵塞的骨料铺洒漏斗,该漏斗制作成本较低,且形状和尺寸适合骨料床 3D 打印混凝土的骨料铺洒过程,并能有效防止漏斗中的骨料出现堵塞现象。

1 方 法

1.1 计算程序

计算采用离散元方法来模拟粗骨料的运动。离散元法通过分析离散单元间的接触并利用相应接触物理力学模型求得单元在物理场中受力,然后以牛顿第二定律为基础,得到单元加速度、速度和位移。该方法是计算非连续颗粒材料的常用方法,最初由 CUNDALL 等^[28]提出。目前,有多种离散元计算程序,如 UDEC^[29],PFC^[30],LIGGGHTS^[19,31],EDEM^[17,32]等。文章采用 EDEM 程序进行计算,其操作和分析界面简单直观,便于参数化设计及计算模型和计算参数的选择,且计算结果得到了大量实验数据的广泛验证^[17]。

文章采用圆球来模拟骨料,因为圆球计算效率显著优于不规则的颗粒,但圆球比真实的不规则骨料更易于滚动,故而不容易堵塞。所以,用圆球计算的堵塞比例通常要比真实骨料堵塞比例低,但这不影响通过漏斗堵塞比例来考查不同变量对堵塞的影响。另外,在计算中可以考虑将骨料和骨料之间以及骨料和漏斗之间的摩擦系数提高,以此降低骨料的滚动性能,间接提高模拟不规则骨料的真实性。

对于骨料间以及骨料和漏斗间的碰撞,计算程序 EDEM 将碰撞分为法向和切向两部分作用。在法向,可用弹簧和阻尼来代表碰撞的弹性和塑性作用力,而在切向,除了弹簧和阻尼外,还用滑块来模拟切向滑动摩擦力。骨料颗粒的运动和作用可用方程组表示:

$$m_i \frac{du_i}{dt} = \sum_{j=1}^K (F_{cn,ij} + F_{dn,ij} + F_{ct,ij} + F_{dt,ij}) + m_i g \tag{1}$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{j=1}^K (T_{t,ij} + T_{r,ij}) \tag{2}$$

式中: u_i 为第 i 个骨料颗粒的平移速度, m/s; I_i 为第 i 个骨料颗粒的惯性矩, m^4 ; ω_i 为第 i 个骨料颗粒的角速度, rad/s; $m_i g$ 代表重力, N; $F_{cn,ij}$ 和 $F_{ct,ij}$ 分别代表骨料颗粒 i, j 间的法向和切向接触力, N; $F_{dn,ij}$ 和 $F_{dt,ij}$ 分别代表骨料颗粒 i, j 间的法向和切向阻尼力, N; K 为颗粒与 i 颗粒接触的个数, 个; $T_{t,ij}$ 为切向力产生的力矩, N · m; $T_{r,ij}$ 为滚动摩擦产生的力矩, N · m。上述作用力可根据相应计算参数得出^[33]。

1.2 计算参数

计算参数主要考虑骨料和漏斗的材料性质及其相互作用,所用参数见表 1。具体来看,骨料参数主要参考岩石的力学参数,其泊松比(Poisson ratio)设为 0.24,密度(Density)设为 2 500 kg/m³,剪切模量(Shear modulus)设为 29.4 GPa。另外,骨料间的碰撞主要由骨料间的恢复系数(Coefficient of restitution)、静摩擦系数(Coefficient of static friction)和滚动摩擦系数(Coefficient of rolling friction)决定,其值分别设为 0.50, 0.40, 0.023,这些系数的确定也参考了岩石材料的特性,并考虑了圆球和实际不规则骨料间的差异,适当选用较高的摩擦系数,来提高模拟的准确性。对于漏斗,其参数主要参考单层钢材的力学参数,其中,漏斗泊松比为 0.27,密度为 7 850 kg/m³,剪切模量为 82.2 GPa,而骨料和漏斗之间的恢复系数、静摩擦系数和滚动摩擦系数分别取 0.56,

表 1 骨料和漏斗的计算参数
Table 1 Calculation parameters for the aggregates and hopper

参数	骨料	漏斗
泊松比	0.24	0.27
密度/(kg · m ⁻³)	2 500	7 850
剪切模量/GPa	29.4	82.2
恢复系数	0.50	0.56
静摩擦系数	0.40	0.30
滚动摩擦系数	0.023	0.010

0.30, 0.010, 这些系数决定了骨料和漏斗间的碰撞作用。由于钢材比岩石弹性强, 故而选用较高的值, 而钢材表面比岩石光滑, 因此选用较低的摩擦系数。计算中, 重力加速度设为 9.8 m/s^2 。

1.3 计算变量

计算主要考虑 3 种不同形状的漏斗, 如图 2 所示。这 3 种漏斗形状分别为圆台、正棱台和斜棱台。其中, 圆台的上下表面为圆形, 而正棱台和斜棱台的上下表面为正方形。漏斗的形状参数考虑了上表面骨料入口的宽度 d_1 (直径或边长), 下表面骨料出口的宽度 d_2 (直径或边长) 和漏斗的高度 h 。计算中, h 为变量, 而 d_1, d_2 保持不变, 分别为 240, 40 mm, 这个取值考虑了 3D 打印的操作空间, 根据打印质量的要求而确定。 h 的取值以及骨料的尺寸和数量见表 2, 其中, 骨料尺寸以模拟圆球的直径来表示, 取值为 10, 11, 12 mm, 而骨料的数量分别取 2 000, 2 500, 3 000, h 的取值为 100, 150, 200 mm。单个漏斗在 3 个变量下共分 27 组, 见表 2。每种漏斗都计算了 27 组, 所以 3 种漏斗共有 81 组计算结果。

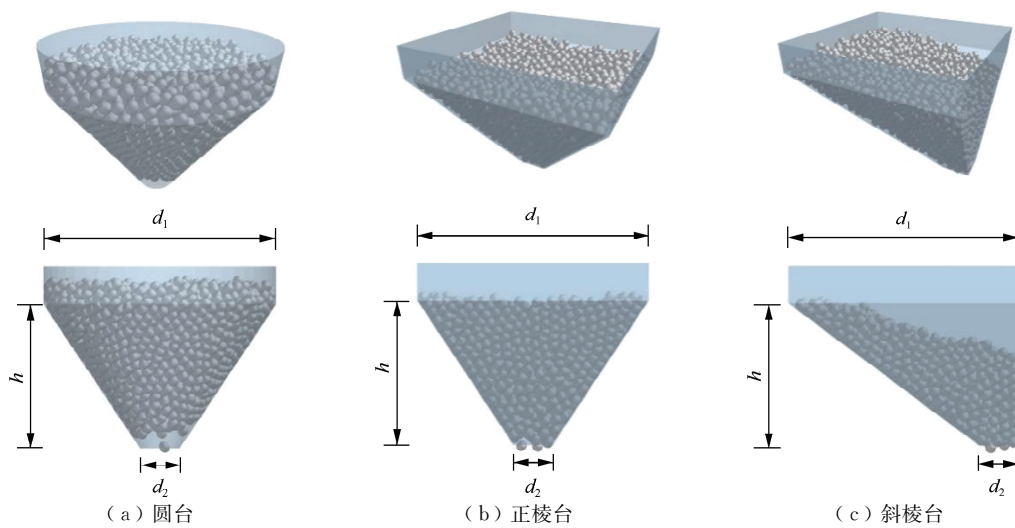


图 2 3 种不同形状漏斗

Fig.2 Three types of hoppers with different shapes

表 2 计算分组和主要参数

Table 2 Calculation groups and parameters

组号	骨料直径/mm	骨料数量	漏斗高度/mm	组号	骨料直径/mm	骨料数量	漏斗高度/mm
1	10	2 000	200	16	10	3 000	150
2	11			17	11		
3	12			18	12		
4	10	2 500	200	19	10	2 000	100
5	11			20	11		
6	12			21	12		
7	10	3 000	200	22	10	2 500	100
8	11			23	11		
9	12			24	12		
10	10	2 000	150	25	10	3 000	100
11	11			26	11		
12	12			27	12		
13	10	2 500	150				
14	11						
15	12						

计算起始时刻,骨料以5 000个/s的速度在漏斗上入口生成,然后骨料在重力作用下,从漏斗下出口漏出,正棱台第17组骨料堵塞的过程如图3所示。其中,图3(a)为骨料全部生成时(0.6 s)的状态。在重力持续作用下,骨料不断漏出,1.6 s时骨料在漏斗中的分布状态如图3(b)所示。当3.2 s时,漏斗中的骨料不再移动,即发生了堵塞,如图3(c)所示。从图3(c)可以看出,堵塞的骨料在漏斗口出现了成拱现象,这和真实颗粒物堵塞漏斗的情况相同。

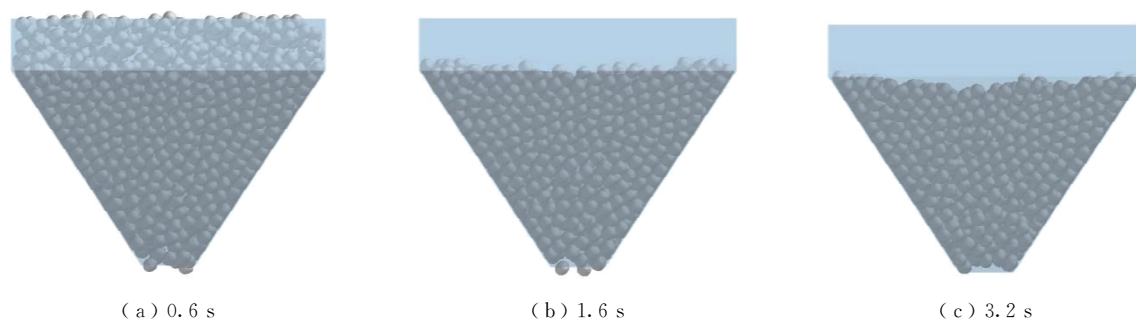


图3 正棱台漏斗第17组骨料堵塞过程

Fig.3 Aggregate-jamming process of group NO. 17 of frustum of square pyramid hoppers

2 结果与讨论

图4为不同形状漏斗的容积 h_c 和堵塞比例 h_r 计算结果。由图4可知,圆台形漏斗的容积相对较小。具体来看,当漏斗高度为100, 150, 200 mm时,圆台漏斗容积分别为1 800.267, 2 700.400, 3 600.533 cm^3 ,而相应的正棱台和斜棱台漏斗具有相同容积,分别为2 293.333, 3 440.000, 4 586.667 cm^3 。造成圆台漏斗容积较小的原因是其上下表面实际是对应正棱台上下表面的内切圆,故而降低了圆台漏斗容积。漏斗容积在以往研究中较少考虑,但圆台形漏斗和曲线侧壁漏斗在文献[15]和文献[23]中有相关研究,其主要目的也是进行防堵塞设计,总体而言,较小容积的漏斗更易堵塞^[23],这和图4

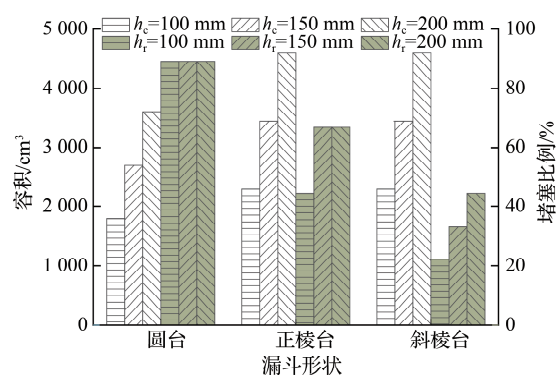


图4 不同形状漏斗的容积和堵塞比例

Fig.4 Volumes and jamming ratios of hoppers with different shapes

右侧纵坐标表示的漏斗堵塞比例的计算结果一致。但漏斗堵塞比例还受其他因素影响,如漏斗种类、漏斗尺寸等。具体而言,圆台形漏斗堵塞比例较高且不受漏斗高度和漏斗容积影响,3种高度的圆台漏斗堵塞比例都为88.9%。而相同特征尺寸下,正棱台漏斗的堵塞比例有明显降低,总堵塞比例为59.3%,其中高度为150, 200 mm时,正棱台漏斗堵塞比例相同,达66.7%,而高度为100 mm时,堵塞比例为44.4%。总之,正棱台漏斗的堵塞比例和漏斗容积呈现微弱的正比例关系,这种关系在斜棱台漏斗中更为明显。相比其他形状漏斗,斜棱台漏斗堵塞比例最低,为33.3%。另外,斜棱台漏斗的堵塞受漏斗高度和漏斗容积的影响更为明显,随着漏斗高度和容积增加,漏斗堵塞比例上升。

造成不同形状漏斗不同堵塞规律的主要原因是漏斗侧面及容积差异。具体来看,圆台漏斗和正棱台漏斗的侧面倾角(和水平方向的夹角)相同,该倾角可根据公式 $\arctan[2h/(d_1-d_2)]$ 计算求得。当高度 h 为100, 150, 200 mm时,其倾角分别为 45.0° , 56.3° , 63.4° 。由于圆台的容积比相应正棱台容积小,在相同骨料堆积下,较为狭小的圆台漏斗更容易堵塞,这和之前漏斗侧壁形状对堵塞的影

响研究结果较为一致^[23]。而相同高度的斜棱台只有两个侧面的倾角, 和对应的圆台或正棱台的倾角相同, 斜棱台另外两个侧面的倾角分别为 90° 和 $\arctan[h/(d_1 - d_2)]$, 后者在高度 h 为 100, 150, 200 mm 时, 其值分别为 26.6° , 36.9° , 45.0° , 倾角较小, 这可能会导致该漏斗易于堵塞。但从图 4 结果可知该斜棱台漏斗其实并不容易堵塞, 其主要原因可归结为侧面呈 90° 且有较大的漏斗容积使得骨料不易成拱^[16,21], 进而避免了高频率堵塞。

图 5 为不同骨料尺寸对漏斗堵塞比例的影响。

由图 5 可知, 随着骨料尺寸增大, 漏斗更易于堵塞, 特别是对圆台和正棱台漏斗来说。当骨料尺寸为 10 mm 时, 所有漏斗的堵塞总平均值为 25.9%, 此时圆台漏斗的堵塞比例相对较高, 为 66.7%, 而正棱台为 11.1%, 斜棱台为 0%, 这说明斜棱台漏斗更不易堵塞。圆台漏斗在骨料为 11 mm 时, 堵塞比例达到了 100%, 而此时正棱台和斜棱台漏斗的堵塞比例分别为 66.7% 和 33.3%, 故堵塞总平均值为 66.7%。当骨料增大到 12 mm 直径, 正棱台漏斗堵塞比例也达到了 100%, 而此时斜棱台漏斗的堵塞比例增长到了 66.7%, 所有漏斗的堵塞总平均值为 88.9%。由此可见, 骨料粒径对漏斗的堵塞影响显著, 随着骨料粒径增加, 漏斗堵塞概率增加, 这和文献中的相关研究一致^[19,27]。然而, 在进行 3D 打印透水混凝土时^[14], 需要较大粒径的骨料来提高混凝土的强度和渗透性。综合来看, 骨料较优的粒径通常为打印砂浆层厚度的 1.5 倍, 即 15 mm 左右, 这种粒径的骨料对于所计算的漏斗来说很容易堵塞^[27], 因此, 需要进一步进行防堵塞设计。

图 6 为骨料数目对漏斗堵塞比例的影响。总体来看, 漏斗总堵塞比例呈现先增大后降低的趋势, 而这种趋势主要是正棱台漏斗导致, 这可能与较多骨料在重力作用下更易于在漏斗平整的侧面滚动有关, 进而造成了在 3 000 个骨料时, 正棱台漏斗堵塞比例下降。类似的, 虽然在 3 000 个骨料时, 斜棱台堵塞比例没有变化 (44.4%), 但可推测, 当进一步增加骨料时, 其堵塞比例可能下降。不过, 再增加骨料数量, 漏斗容积将会填满, 此时堵塞的影响因素又会发生变化, 故而未进一步研究。另外, 圆台形漏斗的堵塞比例不受骨料数量影响, 其值为 88.9%。和前面骨料尺寸相比, 骨料数目对漏斗堵塞的影响较小^[19,24]。因此, 在漏斗防堵塞设计时, 可以较少考虑骨料数目的影响。

图 7 为漏斗高度对漏斗堵塞比例的影响。整体来看, 漏斗堵塞比例随漏斗高度的增加而增加, 但幅度不太明显, 尤其是对圆台和正棱台漏斗。这种增长的趋势主要集中表现在斜棱台漏斗中。造成这种趋势的原因, 可能是漏斗高度的增加使漏斗侧面的长度增加, 进而延长了骨料在漏斗中的滞留时间, 较长的滞留时间增加了骨料成拱和堵塞的概率。具体来看, 斜棱台漏斗的堵塞比例从 $h=100$ mm 时的 22.2% 增长到了 $h=150$ mm 时的 33.3%, 进而达到 $h=200$ mm 时的 44.4%。而正棱台

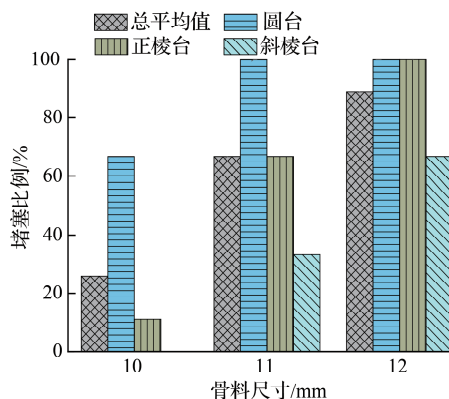


图 5 骨料尺寸对堵塞比例的影响

Fig.5 Influences of aggregate size on the jamming ratios

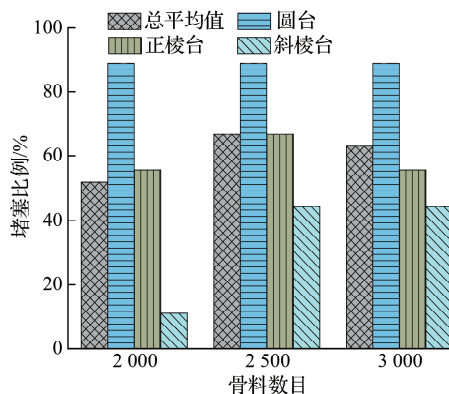


图 6 骨料数目对堵塞比例的影响

Fig.6 Influences of aggregate quantities on the jamming ratios

漏斗的堵塞比例为 44.4%，66.7%，66.7%，圆台漏斗的堵塞比例在 3 种漏斗高度下不变，都为 88.9%。同样，和骨料尺寸相比，漏斗高度对漏斗堵塞的影响也较小^[25,27]。因此，在漏斗防堵塞设计时，也可以较少考虑漏斗高度的影响。

3 防堵塞设计

由上述结果可知，斜棱台漏斗在容积和堵塞概率上相对较优，可考虑用该形状进行防堵塞设计。但随着骨料粒径的增大，所有漏斗的堵塞概率都会显著升高。为进一步降低漏斗堵塞概率，考虑在漏斗侧壁上增加持续扰动，如图 8 所示。扰动球为一个可沿漏斗侧壁移动的半球。图 8 (a) 为数值计算简图，所示漏斗为防堵塞的斜棱台漏斗，漏斗尺寸综合考虑了防堵塞设计、操作空间限制、打印质量要求等因素。在相同骨料尺寸和骨料数目下，增加往复运动的扰动球，该漏斗仍没有发生堵塞，进而验证了文章设计的优越性。在实际设计中，扰动球可通过气缸来控制其往复运动^[34]，如图 8 (b) ~图 8 (d) 所示。气缸通过电磁阀和磁性开关传感器来实现伸缩杆的伸缩，伸缩杆的前端连接扰动球，如图 8 (e) 所示。该防堵塞漏斗可安装在机械臂前端，和水泥砂浆 3D 打印机配合进行骨料床 3D 打印混凝土的生产，如图 8 (f) 所示。

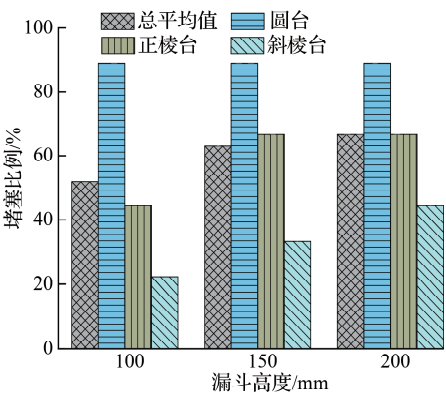


图 7 漏斗高度对堵塞比例的影响

Fig.7 Influences of hopper heights on the jamming ratios

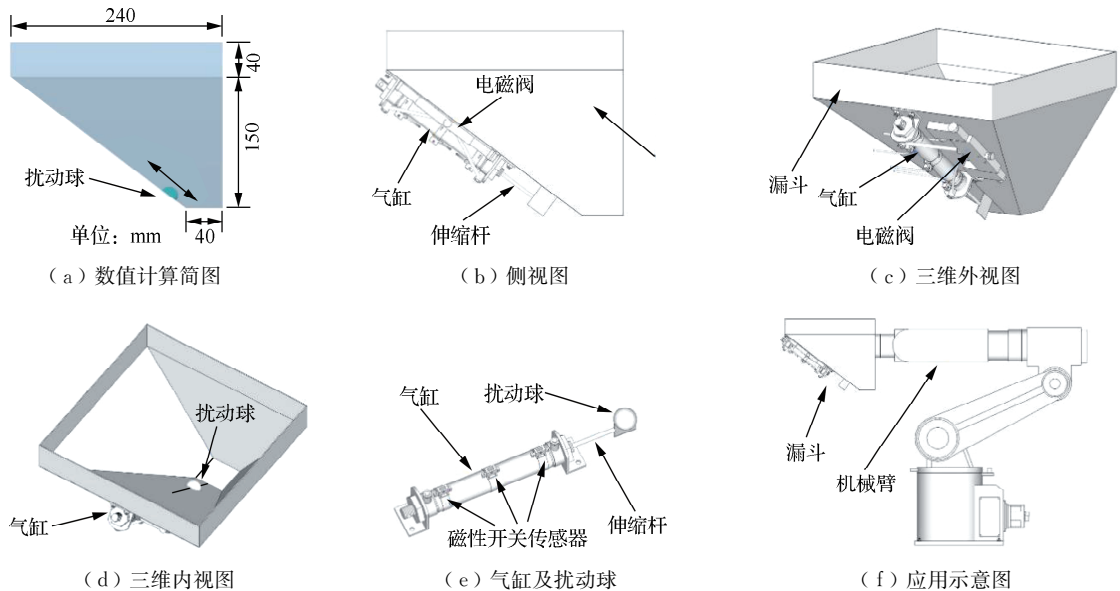


图 8 铺洒骨料漏斗的防堵塞设计^[34]

Fig.8 Anti-jamming design of aggregate-spreading hopper^[34]

4 结 论

研究了骨料铺洒漏斗的堵塞规律并设计了相关防堵塞漏斗。主要结论为：
1) 在相同操作空间下，斜棱台和正棱台漏斗的容积相同，但比圆台漏斗容积大。在铺洒骨料时，圆台漏斗堵塞概率最大，正棱台漏斗次之，斜棱台漏斗的堵塞概率最小，因此，综合考虑容积和堵塞概率，优先选择斜棱台漏斗。

2) 相比骨料数目和漏斗高度, 骨料尺寸对漏斗堵塞影响较大。随着骨料尺寸的增加, 漏斗堵塞概率增加。这种影响对圆台、正棱台、斜棱台漏斗依次减弱。骨料数目对漏斗堵塞的影响整体呈现先增大后减小的趋势, 而漏斗高度的增加, 也会增加漏斗堵塞的概率。

3) 在漏斗侧壁上增加往复运动的扰动球可显著降低漏斗堵塞概率。扰动球的运动可通过漏斗侧壁外设置的气缸、电磁阀和磁性传感器的共同作用来实现。该设计成本较低, 能有效防止在使用骨料床 3D 打印混凝土的过程中铺洒骨料漏斗的堵塞。

参考文献:

- [1] LOWKE D, DINI E, PERROT A, et al. Particle-bed 3D printing in concrete construction possibilities and challenges [J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 112: 50-65.
- [2] ZHANG C, NERELLA V N, KRISHNA A, et al. Mix design concepts for 3D printable concrete: a review[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2021, 122: 104155.
- [3] 汤寄予, 张亚可, 高丹盈, 等. 3D 打印混凝土研究现状及前景展望[J]. *河南大学学报(自然科学版)*, 2022, 52(6): 734-744.
- [4] JI G C, XIAO J Z, ZHI P, et al. Effects of extrusion parameters on properties of 3D printing concrete with coarse aggregates[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 325: 126740.
- [5] LIU H W, LIU C, BAI G L, et al. Influence of pore defects on the hardened properties of 3D printed concrete with coarse aggregate[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 55: 102843.
- [6] WANG X G, JIA L T, JIA Z J, et al. Optimization of 3D printing concrete with coarse aggregate via proper mix design and printing process[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 56: 104745.
- [7] 刘化威, 刘超, 白国良, 等. 基于孔结构缺陷的 3D 打印粗骨料混凝土力学性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2022, 55(12): 54-64.
- [8] LIU C, CHEN Y N, ZHANG Z D, et al. Study of the influence of sand on rheological properties, bubble features and buildability of fresh foamed concrete for 3D printing[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 356: 129292.
- [9] SINGH A, LIU Q, XIAO J Z, et al. Mechanical and macrostructural properties of 3D printed concrete dosed with steel fibers under different loading direction[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 323: 126616.
- [10] YU S W, DU H J, SANJAYAN J. Aggregate-bed 3D concrete printing with cement paste binder[J]. *Cement and Concrete Research*, 2020, 136: 106169.
- [11] 吕奇峰, 辛格, 朱平华, 等. 一种 3D 打印透水混凝土结构及其制备方法: CN114434590A[P]. 2022-05-06.
- [12] HAO J H, LI Y J, LIU Y, et al. Jamming in granular shear flows of frictional, polydisperse cylindrical particles [J]. *Advanced Powder Technology*, 2021, 32(10): 3746-3759.
- [13] SUN H L, XU S L, PAN X D, et al. Investigating the jamming of particles in a three-dimensional fluid-driven flow via coupled CFD-DEM simulations[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2019, 114: 140-153.
- [14] 封金财, 李涛, 刘文影. 骨料掺量对硅气凝胶砂浆性能的实验研究[J]. *常州大学学报(自然科学版)*, 2019, 31(2): 88-92.
- [15] LIU H R, JIA F G, XIAO Y W, et al. Numerical analysis of the effect of the contraction rate of the curved hopper on flow characteristics of the silo discharge[J]. *Powder Technology*, 2019, 356: 858-870.
- [16] LIU H R, HAN Y L, JIA F G, et al. An experimental investigation on jamming and critical orifice size in the discharge of a two-dimensional silo with curved hopper[J]. *Advanced Powder Technology*, 2021, 32(1): 88-98.
- [17] ZHANG Y X, JIA F G, ZENG Y, et al. DEM study in the critical height of flow mechanism transition in a conical silo[J]. *Powder Technology*, 2018, 331: 98-106.
- [18] MEHDIZAD M, FULLARD L, GALVOSAS P, et al. Quantitative measurements of flow dynamics in 3D hoppers

- using MRI[J]. Powder Technology, 2021, 392: 69-80.
- [19] ZHAO Y, CHEW J. Effect of lognormal particle size distributions of non-spherical particles on hopper discharge characteristics[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2020, 163: 230-240.
- [20] FENG W Y, HAN Y L, CHEN P Y, et al. Effect of eccentricity on the particle flow characteristics in a double-orifice silo[J]. Powder Technology, 2023, 421: 118413.
- [21] CHEN F Y, XIA Y D, KLINGER J, et al. Hopper discharge flow dynamics of milled pine and prediction of process upsets using the discrete element method[J]. Powder Technology, 2023, 415: 118165.
- [22] LYU Q F, CHEN A G, JIA J, et al. Fluids flow in granular aggregate packings reconstructed by high-energy X-ray computed tomography and lattice Boltzmann method[J]. Computers & Fluids, 2023, 253: 105787.
- [23] HUANG X J, ZHENG Q J, LIU D D, et al. A design method of hopper shape optimization with improved mass flow pattern and reduced particle segregation[J]. Chemical Engineering Science, 2022, 253: 117579.
- [24] XU S L, SUN H L, CAI Y Q, et al. Studying the orifice jamming of a polydispersed particle system via coupled CFD-DEM simulations[J]. Powder Technology, 2020, 368: 308-322.
- [25] FAN J H, LUU L H, PHILIPPE P, et al. Discharge rate characterization for submerged grains flowing through a hopper using DEM-LBM simulations[J]. Powder Technology, 2022, 404: 117421.
- [26] 麻礼东, 杨光辉, 张晟, 等. 三维漏斗中颗粒物质堵塞问题的数值实验研究[J]. 物理学报, 2018, 67(4): 132-137.
- [27] ZHAO Y, COCCO R A, YANG S L, et al. DEM study on the effect of particle-size distribution on jamming in a 3D conical hopper[J]. AIChE Journal, 2019, 65(2): 512-519.
- [28] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Géotechnique, 1979, 29(1): 47-65.
- [29] HE S D, LI Y R, AYDIN A. A comparative study of UDEC simulations of an unsupported rock tunnel[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2018, 72: 242-249.
- [30] XU F, LI X Y, XIONG Q Y, et al. Influence of aggregate reinforcement treatment on the performance of geopolymer recycled aggregate permeable concrete: from experimental studies to PFC 3D simulations[J]. Construction and Building Materials, 2022, 354: 129222.
- [31] BERGER R, KLOSS C, KOHLMAYER A, et al. Hybrid parallelization of the LIGGGHTS open-source DEM code[J]. Powder Technology, 2015, 278: 234-247.
- [32] WEI H, ZHAO Y H, ZHANG J, et al. LIGGGHTS and EDEM application on charging system of iron making blast furnace[J]. Advanced Powder Technology, 2017, 28(10): 2482-2487.
- [33] YU Y W, SAXÉN H. Experimental and DEM study of segregation of ternary size particles in a blast furnace top bunker model[J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(18): 5237-5250.
- [34] 吕奇峰, 戴鹏飞, 吴恒. 一种自动化铺洒粗骨料的漏斗: CN217970850U[P]. 2022-12-06.

(责任编辑:李艳,周安迪)