

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.02.003

# 建筑排水横管中固体污物及其输送性能研究进展

刘壮壮, 许萍

(北京建筑大学城市雨水系统与水环境教育部重点实验室 水环境国家级实验教学示范中心, 北京 100044)

**摘要:** 针对目前大规模使用节水器具后,因冲水量减少而有可能造成建筑排水横管内出现固体污物沉积和堵塞问题,在阐明排水管道内固体污物的成分和形状特性的基础上,着重研究卫生器具类型、冲水量、管材粗糙度、坡度、管径和弯头等因素对固体污物输送距离的影响。研究结果表明,固体污物的形状、尺寸和密度是影响其输送距离的重要因素;坐便器排水的峰值流量越大,推动固体污物的输送距离越长;弯头曲率半径越长,在水流转弯时的能量损失越小,固体输送距离越长;在坐便器小水量排水情况下,可对横管的坡度和管径等设计参数进行优化,适当增加横管坡度或减小管径,从而增加横管内固体污物的输送速度和输送距离。

**关键词:** 建筑排水横管; 固体污物; 输送距离; 冲水量

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)02-0014-07

## Research Progress of Solid Waste and Its Transport Performance in Building Drainage Horizontal Pipe

LIU Zhuang-zhuang, XU Ping

(National Experimental Teaching Demonstration Center of Water Environment, Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

**Abstract:** The reduction in flushing volume may cause solid deposits and blockages in the building drainage horizontal pipes for the current large-scale use of water-saving appliances. Based on expounding the composition and shape characteristics of solid waste in the drainage pipeline, the influences of sanitary appliance type, water discharge, pipe roughness, slope, pipe diameter and elbow on the transport distance of solid waste were studied, respectively. The research results showed that the shape, size and density of solid wastes are the internal factors that affect the transport distance of solid. The transport distance of the solid waste would be increase with the improvement of the peak flow rate of the toilet drainage. Additionally, increasing the curvature radius of the elbow would cause lower energy loss when the flow turns and longer solid transport distance. The parameters such as the slope and pipe diameter of the horizontal pipe can be optimized under small discharge of the toilet. Appropriate measures such as increasing the slope of the horizontal pipe or reducing the pipe diameter were taken to increase the transport speed and distance of solid waste in the horizontal pipe.

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07110-008-006)

通信作者: 许萍 E-mail: xuping@bucea.edu.cn

**Key words:** building drainage horizontal pipe; solid waste; transport distance; flushing volume

建筑排水横管是建筑内部排水系统的重要组成部分,深入理解排水横管的固体污物及其输送性能是保证排水系统稳定运行的前提。排水横管的输送性能是指固体污物自卫生器具进入排水横管后,在横管水流的推动作用下,固体污物在横管中移动的最大距离。国外对排水横管内固体输送距离的研究较早,欧洲早在20世纪50年代就进行了建筑排水横管内固体输送距离实验和相关数值模拟的研究<sup>[1]</sup>,随后日本、美国和澳大利亚等国家也对其系统性进行了相关研究。近年来,国内对影响排水横管内固体输送距离的因素进行了相关实验,主要集中于研究坐便器类型和冲水量对横管内固体输送距离的影响,以及排水横管坡度和管径对固体输送距离的影响<sup>[2-4]</sup>。在探究国内外相关研究的基础上,阐明了排水管道内固体污物的成分、尺寸和密度特性,讨论了卫生器具类型与冲水量对固体输送距离的影响,探讨了横管的管材粗糙度、管道坡度和管径等设计参数以及弯头曲率半径与固体污物输送距离的关系。研究成果对今后在节水器具小水量排水情况下,合理进行排水横管设计以防止管道内固体沉积和堵塞具有参考与指导意义。

## 1 固体污物的成分、形状特性及其影响

固体污物在输送过程中其形态特征较为复杂,固体污物自身的成分、形状、尺寸大小和密度等材料特性是影响其在横管中输送距离的主要因素之一。根据英国Friedler等1996年的统计结果,除了粪便和厕纸在下水道中被分解而无法统计次数外,笔者将其余固体污物大致分为卫生污物、药具、浴室其余污物和厨房污物等,其中,卫生污物包括卫生棉条、湿巾等,药具污物包括牙线、棉签、棉球涂药器等,浴室其余污物包括包装纸、毛发、化妆品、烟头等,厨房污物包括菜叶和食物等。

虽然Friedler等人的研究未包括粪便,但实际排水管道内的固体污物成分仍以粪便为主。初始的粪便状态接近实心圆柱体状态,在坐便器的冲刷、与管道弯头碰撞、横管内水流的剪切力和与管壁的摩擦等作用下,圆柱形粪便固体会逐渐破碎并接近于小球状。

关于粪便的形状和成分,美国国家标准局研究表明<sup>[5]</sup>:健康成年人的粪便形状长度约为100~200 mm,直径为15~40 mm,质量为100~200 g。1982年英国学者Bokor指出粪便的含水率约为67%,在33%干质量中包含约30%的非致病菌,且干质量中主要是难以消化的纤维素食物残渣。郑承军<sup>[6]</sup>的研究表明,粪便中3/4约为水,1/4为干固体,与Bokor的研究结论相似;此外,郑承军还发现,干固体中10%~20%为脂肪、2%~3%为蛋白质、10%~20%为无机盐、30%为死细菌、30%为未消化的纤维素残渣及消化液中脱落的上皮细胞。

固体污物的形状、尺寸、密度等特性会影响横管中固体与水、管壁的相互作用。Davies等<sup>[7]</sup>采用7种海绵圆柱体(NBS固体)作为模拟粪便(密度为0.96~1.06 g/cm<sup>3</sup>,直径为10~38 mm),进行了横管内间歇流状态下固体输送实验,发现不同密度的NBS固体速度变化不大;对于相同密度的固体,随着固体尺寸的减小,在横管内水流充满度小于0.25的位置更容易沉积;并得出固体尺寸是影响固相在间歇流中输送的重要因素,而密度的影响有限。国内冯旭东等<sup>[3]</sup>和张哲等<sup>[4]</sup>也开展了类似研究,发现在相同的管道参数和冲水量情况下,不同类型固体在横管内输送距离的排序为塑料小球>肠衣>胶棉>卫生纸团。冯旭东等<sup>[3]</sup>和张哲等<sup>[4]</sup>认为,塑料小球的密度较小,在管道内呈漂浮状随水流进行输送,小球的绕流阻力与管壁的摩擦力均较小;胶棉和肠衣的密度都略大于水,尺寸约20 mm×80 mm,在横管下游水深较浅时增加了与管底的接触面积,从而增大了与管壁的滑动摩擦力;而与肠衣相比,胶棉材料具有较强的吸水性,吸水后的胶棉与管壁的摩擦力相对较大;卫生纸的输送与前三种固体相比较为不利,湿水后卫生纸膨胀与管壁接触面积大,造成移动过程中滑动摩擦力大。

## 2 卫生器具类型及其影响

### 2.1 卫生器具类型

在各类卫生器具中,坐便器对固体污物输送距离的影响最为显著。目前,常用的坐便器按冲洗原理和内部存水弯的构造不同分为冲落式和虹吸式,

两类坐便器在相同冲水量下产生的峰值流量和排水时长存在显著差异,因此对排水后携带固体污物的输送距离产生影响。虹吸式坐便器水箱出水排入便盆后,较细的虹吸弯道会很快被水充满,通过虹吸作用将粪便等污物吸出。而冲落式坐便器主要利用水箱高度产生的势能进行冲洗,当水从水箱沿盆面周边的小孔冲下后,势能转化产生的冲击力将粪便等污物冲出存水弯而进入排水横管。

坐便器排水过程中峰值流量是影响固体污物输送距离的关键因素。冯旭东等<sup>[3]</sup>研究发现,当冲洗水量为4.5、6 L时,虹吸式坐便器的峰值流量较冲落式高出1.0~1.2 L/s,在De160 mm、坡度0.026的横管内,肠衣的输送距离增大了3.0~4.0 m。同样,日本也有研究者比较了不同类型坐便器的排水特性和输送性能实验,实验结果与冯旭东等的结论相似。不同类型坐便器的排水特性对比见表1。

表1 不同类型坐便器的排水特性对比

Tab.1 Comparison of drainage characteristics of different types of toilets

坐便器类型	冲水量/ L	有效冲洗 时间/s	峰值流量/ (L·s <sup>-1</sup> )	固体输送 距离/m
下排水冲落式	4.5	4~7	1.5	3.9
	6.0	4~8	2.0	8.0
	9.48	4.2	1.85	9.5
普通虹吸式	4.8	5~7	2.7	7.9
	6.0	3~7	3.0	11.1
	9.87	2.5	2.78	15.0

Kobayashi等<sup>[8]</sup>对比研究4.2 L高效虹吸马桶和6 L普通马桶的排水特性时还发现,前者的峰值流量高出后者0.28 L/s,使卫生纸的平均输送距离增大了0.2 m,说明4.2 L高效虹吸马桶的流道结构经过优化设计,所产生的高冲洗速度可以弥补小体积水量带来的输送较慢问题。

当峰值流量相同时,坐便器排水口与横支管连接方式对固体输送距离的影响差别较小。翟立晓<sup>[9]</sup>测试了同品牌的6 L后排水和下排水冲落式坐便器,发现二者的峰值流量均为1 L/s;在内径100 mm、坡度0.012的横管内,这两种便器对人造试体的输送距离均为8.5~9.0 m,几乎无差异。

坐便器排水的持续时间对固体污物的输送距离也有影响,但相对于峰值流量瞬间推动固体输送距离的影响较小。冲落式坐便器的峰值流量较小,

但是其峰值流量能保持一定的时间,相同冲水量下冲落式坐便器对固体污物的有效冲洗时间比虹吸式长1~2 s<sup>[3,9]</sup>,但仍小于虹吸式坐便器对固体的冲洗输送距离。

## 2.2 冲水量

同类型的坐便器冲水量越大,产生的峰值流量越高,从而为固体污物输送提供较快的初始流速,以及后续排水量维持的输送流速,进而越有利于管内固体输送。随着冲水量的减小,固体初始流速不断降低,当管内流速低于自清流速时,则会发生固体沉积现象。

英国较早地开展了冲水量减小对固体输送距离的影响研究,1987年Lillywhite研究发现6 L水量冲洗横管中的固体污物效果良好,少于4 L的排水量会对固体输送产生不利影响,少于3 L则会使排水堵塞几率大大增加。但随后McDougall等<sup>[10]</sup>测试了单个固体的排放特性,发现如果对排水横管管径、坡度或横截面进行优化,小幅度减少冲洗量并不会降低固体输送效率,提出了与Lillywhite不同的结论。

研究表明,在坐便器类型和横管设计参数相同的情况下,增加冲水量可以提高固体污物在横管中的输送距离,器具排水量与固体输送距离呈线性增加关系。Lillywhite和McDougall在相同排水量下试验的固体输送距离的差别,主要在于两人选用的固体模拟物和横管管径不同。

## 3 排水横管设计参数与弯头曲率半径的影响

为使横管中固体污物不堵塞管道,排水横管设计的重要原则是:在横管设计充满度时,管内流速应不小于管内不发生淤积的流速(自清流速)。管内固体的初始速度是坐便器排水时水流的冲击力提供的,推流速度是依靠管道的敷设坡度来实现。一般而言,影响排水横管内固体输送距离的管道设计参数有管材粗糙度、横管坡度和管径等,其中坡度是影响固体输送距离的主导因素。

Swaffield<sup>[11]</sup>研究认为“固体速度取决于周围的流动条件,随着水流量的衰减,就会发生固体沉积”,这意味着,对于固定坡度、管径和粗糙度的横管,任何固体都有一个最大的输送距离。Gormley等<sup>[5]</sup>研究发现,固体在管道第一次沉积后,当后续排水量积累到使固体再次运动的阈值时,固体才会继



续向前推进。翟立晓<sup>[9]</sup>研究发现 6 L 冲落式坐便器排水在坡度 0.004、内径 100 mm 的横管内,肠衣固体第一次输送距离是 4 m,第二次清水排水经过管道的能量损失后剩余水头使固体污物向前推进了 1.5 m,多次冲洗后的最大输送距离达到 6~7 m。

3.1 管材粗糙度

管材粗糙度直接影响固体污物与管壁的摩擦力,随着管材粗糙度的增加,固液与管壁的摩擦阻力增加,单位长度内固体能量损失也越大,导致固体污物的输送距离减小。排水横管的管材粗糙度  $n$  比较:铸铁管>内壁螺旋 UPVC 管>内壁光滑 UPVC 管>PP 静音管。

根据曼宁公式( $v=\frac{1}{n}R^{\frac{2}{3}}I^{\frac{1}{2}}$ ),粗糙度  $n$  与流速  $v$  成反比,以塑料管和铸铁管为例,塑料管和铸铁管的粗糙度  $n$  分别为 0.009 和 0.013<sup>[12]</sup>,比较在内径 100 mm、坡度 0.012 和充满度 0.5 情况下的流速,此工况下塑料管内流速为 1.04 m/s,大于铸铁管内流速(0.72 m/s),因此固体污物在 UPVC 管内的输送距离要长于铸铁管。

3.2 水力坡度

根据曼宁公式,水力坡度  $I$  与管内流速  $v$  成正比,水力坡度越大,流速越大。在重力流排水管道中,水力坡度也即是管道的敷设坡度。因此,敷设坡度的改变直接影响管内固体输送速度,增加坡度能够明显提升固体输送距离。

McDougall 等<sup>[13]</sup>建立了预测胶棉状和纸状等可

变形固体材料在排水横管中输送距离的数值计算模型,研究确定了固体速度  $V_{sol}$  与移动距离  $L$  和排水坡度  $G$  之间的关系: $V_{sol} = C_1 - C_2 \sqrt{\frac{L}{G}}$ ,设定  $V_{sol}=0$ ,证实了固体沉积距离随排水坡度的增大而增大。而 Masayuki 等<sup>[14]</sup>在公厕中安装 5 个 4.8 L 坐便器和 5 个 6.0 L 坐便器串联的长直横管,研究了在不同敷设坡度下的输送性能,实验证明坡度从 0.01 改到 0.005 会使固体输送距离减小 30%~35%。

国内张磊<sup>[2]</sup>、冯旭东等<sup>[3]</sup>和张哲等<sup>[4,15]</sup>也研究了不同坡度条件下横管内的固体输送距离,均得出在某特定的排水参数情况下,设置对应的坡度和管径参数从而有利于固体输送。2008 年张磊<sup>[2]</sup>研究发现坡度为 0.02 时的输送性能明显优于坡度为 0.01 的横管,提出 6 L 节水型坐便器的排水横管径宜定为 DN75 和坡度应不小于 0.02。近年来,张哲等<sup>[4]</sup>研究得出,卫生纸团、胶棉和肠衣等三种固体的输送距离均随坡度的增大呈指数型增加,原因是排水管道坡度的增加可明显提升横管内水流流速,但在坡度大于一定程度时作用不明显。随后,张哲等<sup>[15]</sup>研究了介护坐便器连接的排水横管输送性能,提出使用较长的排水横管时敷设坡度应大于 0.02,可以考虑设置 DN75 管径。在具有明显间歇性使用特征的大型公厕的排水横管设计时,冯旭东等<sup>[3]</sup>提出 De160 排水横管的设计坡度不宜小于 0.015。

综上,国内外学者对不同管道坡度时固体模拟物的输送距离研究结果<sup>[2-4,14]</sup>如表 2 所示。

表 2 不同管道坡度时固体模拟物的输送距离

Tab.2 Transport distance of solid simulant under different pipeline slopes

m

项 目	输送距离			情景
	管道坡度 0.02	管道坡度 0.01	管道坡度 0.005	
Otsuka 试验结果		4.8	3.2	BL 型纸团,4.8 L 冲落式,内径 100 mm
张磊试验结果	18.0	13.5		PVC 海绵条+纸团,6 L 冲落式,内径 75 mm
冯旭东试验结果	16.8	10.9		肠衣,4.8 L 虹吸式,De160 mm
张哲试验结果	6.0	3.1	2.6	肠衣,6 L 冲落式,DN100

根据上述研究结果可知,由于重力流排水管道内流体的输送是通过流体重力势能提供的,对于排水量≤6 L 的节水坐便器链接的排水横管,应将管道坡度增至 0.02。对比国内外研究结论,普遍认为在坐便器冲水量和管径相同的情况下,固体输送距离与横管坡度呈正相关,坡度是影响固体输送距离的主导因素。

3.3 管径

横管管径大小和管内充满度也是影响固体输送距离的重要因素。当排水量和管道坡度相同时,适当减小横管管径,此时管道内水流充满度增加,水力半径增加,进而流速增大;由于水深增加,固体污物与管底摩擦面积和几率减小,从而更有利于固体输送。

关于管径对管道内固体输送距离的影响,早在1954年ISE报告中就提出,当坐便器达到6 L排水量时,使用75 mm横管管径替代传统100 mm管径,能够提高横管内水流的自清流速,减缓小排水量下横管内固体沉积问题的发生。1994年 McDougall等<sup>[16]</sup>运用DRAINET模型对与坐便器相连排水横管内的固体输送进行模拟分析,得出当坐便器冲洗水量减至6 L以下时,将排水横管管径减至80 mm是可行的。2003年 McDougall等<sup>[10]</sup>研究发现,当横管管径按150、100和75 mm依次递减时,在坡度0.01、长20 m的排水横管上任意位置的水流充满度和流速的最大值均增大,使固体污物的输送距离增加。

管内水流充满度是管道输送能力的关键参数,固体污物附近的水流充满度决定固体污物的浮力,浮力越大则固体污物就越不容易沉积;固体污物在横管内水深小于固体自身高度的位置发生沉积。

2008年张磊<sup>[2]</sup>研究了6 L冲落式坐便器对固体污物的冲洗效果,当横管坡度设置为1%时, DN75管道比DN100管道系统使污物全部排出横管的频率高。近年来,张哲<sup>[4]</sup>研究得出当冲水量和横管坡度相同时,管径增大水流充满度低,固体污物与管底接触摩擦几率增加,从而不利于污物的输送。然而美国PERC<sup>[17-18]</sup>在公厕滥用卫生纸的情况下,测试了横管管径从4英寸(101 mm)减小到3英寸(76 mm)时的固体输送性能,发现卫生纸团的输送距离有小幅提升,但并不能持续改善管道的输送性能;究其原因高湿韧强度的卫生纸吸水膨胀后吸附于管内壁而停止运动,使后续排水所需的起动能量增加;同时卫生纸与管壁的接触面积增大,在小直径管道中阻碍气流传播,从而增大了气水混乱状态。

综上,国内外学者研究不同管径时固体模拟物的输送距离的结果见表3。

表3 不同管径时固体模拟物的输送距离

Tab.3 Transport distance of solid simulant under different pipe diameters

m

项 目	输送距离				情景
	DN75	DN90	DN100	DN150	
McDougall 试验结果	21.5		12.1	8.0	NBS固体,6 L冲落式,坡度0.01
张磊试验结果	17.3		13.0		PVC海绵条+纸团,6 L冲落式,坡度0.01
吴俊奇试验结果	17	15	14.0		人造肠衣,6 L虹吸式,坡度0.012
张哲试验结果			9.7	7.8	胶棉,6 L喷射虹吸式,坡度0.015
PERC 试验结果	DN75较DN100,不能持续改善管道的输送性能				由于卫生纸的材料特性,在DN75管内阻碍气流传播

由上述研究结果可知,对于排水量≤6 L的节水坐便器,宜适当减小排水横管的管径,从而增加管内水流充满度,进而增大固体污物的输送距离。对比国内外的研究结论,较多研究认为在排水量和横管坡度相同的情况下,减小横管管径将有利于固体输送,使其输送距离增加。

### 3.4 弯头曲率半径

排水管道中流体经过弯头产生的局部能量损失,对固体污物的输送速度和沉降性能都有较大的影响。水流与污物经过水平弯头时,存在三部分的能量损失<sup>[19]</sup>:①水流与弯头内壁撞击而改变流向会损失较大一部分能量;②少部分水流受到管壁的反作用力而产生“回涌”,“回涌”对后续水流和污物的运动产生阻碍作用;③经过弯头后的水流充满度降低,污物与管底的接触面积增大。而弯头曲率半径的大小对流体的能量损失不同,当增大弯头曲率半径时,能够减少水流经过弯头时的能量损失,使流

速的降低幅度减小和固体输送距离相对增大。

黄鋈尧<sup>[19]</sup>研究了横管中弯头的存在对固体输送距离的影响,发现当横管坡度为0.02、管径为100 mm且存在一个水平90°弯头时,6 L冲落式坐便器排水纸团的输送距离仅为2.9 m,相比于无弯头时减少2.7 m。龚旭<sup>[20]</sup>通过Fluent模拟研究了弯头曲率半径对流体流态的影响,结果表明,与流体通过曲率半径为1倍管径的弯头相比,流体通过曲率半径为4倍管径的弯头后其流速明显较大,湍流动能明显较小。因此,弯头曲率半径越大,水流通过弯头的局部能量损失越小,固体输送距离也越长。

## 4 其他影响因素

排水系统内表面活性剂的添加有利于固体输送。Gormley等<sup>[21]</sup>研究发现在排水管内添加表面活性剂可使固体输送速度提高16%,即使在减少排水量的情况下固体输送性能也不会减弱。随后,Campbell等<sup>[22]</sup>搭建了用于模拟排水系统中固体沉

积速率的加药装置,实验证明添加肥皂可以抑制约14%的沉积,添加调理剂可抑制约45%的沉积,添加洗碗机洗涤剂可抑制约20%的沉积。

排水管道内油脂和脂肪等成分在输送过程中存在慢性沉积问题。Nieuwenhuis等<sup>[23]</sup>提取排水管道内油脂、脂肪沉积堵塞的样本分析堵塞的原因和位置,研究发现,沉积物是钙基脂肪酸盐的皂化过程形成的,与家庭使用的食用油类型有关;油脂和脂肪易在下水道内的连接位置发生堵塞。

## 5 总结和展望

### 5.1 总结

固体污物在横管中的输送距离是由多种影响因素共同作用的结果,固体的输送距离不仅与固体污物自身材料特性有关,同时也受卫生器具的构造类型、冲水量及管材粗糙度、坡度和管径等横管设计参数和弯头曲率半径,以及表面活性剂、油脂和脂肪等其他因素的影响。

① 固体污物的形状、尺寸、密度等特性会影响横管中固体与水、管壁的相互作用,是影响其输送距离的重要因素。

② 相同排水量下,虹吸式坐便器排水产生的峰值流量较冲落式坐便器高,推动固体污物的输送距离长。

③ 管材粗糙度越大,单位管道长度上流体的能量损失越大,固体输送距离越小。

④ 在目前普遍使用小水量节水型坐便器情况下,若室内空间限制管道的敷设坡度,可适当减小横管管径,以提高管内水流充满度,进而增加管内流速;或保持管道管径不变,根据管道长度和室内空间提高管道坡度,以增加管内流速和固体污物输送距离,防止管路沉积堵塞。

⑤ 增大弯头曲率半径,能够减少水流经过弯头时的能量损失,使流速的降低幅度减小,固体的输送距离相对增大。

### 5.2 展望

构建建筑排水系统中固体输送模型是建筑排水领域的一个重要课题,固体在排水系统中的输送特性在已有文献中进行了广泛实验研究,国外研究学者基于收集的数据开发了几种半经验预测方法,在解释不太复杂的固体输送问题时已被证明是可行的。我国学者可借鉴国外研究学者成功经验,考

虑管道几何约束和固体材料性质的影响参数,将半经验的模型深化以获得准确的预测结果。过去10年中流体动力学模拟技术的发展,使得目前可以对许多复杂的几何图形进行建模,未来将运用CFD软件研究在特定的管道条件下模拟固体输送性能。

### 参考文献:

- [1] LITTLEWOOD K. Movement of Gross Solids in Small Diameter Sewers [D]. London: University of London, 2000.
- [2] 张磊. 管道布置方法对节水型坐便器输送性能影响的试验研究[J]. 给水排水, 2008, 34(9): 81-85.  
ZHANG Lei. Pilot study of the piping layout on the transmission-performance of water-saving toilets [J]. Water & Wastewater Engineering, 2008, 34(9): 81-85 (in Chinese).
- [3] 冯旭东,任国栋,陈立宏,等. 大型公共卫生间排水横管污物输送能力测试与研究[J]. 给水排水, 2016, 42(10): 116-120.  
FENG Xudong, REN Guodong, CHEN Lihong, et al. Test and study on horizontal drainage pipe capacity in large public toilet [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(10): 116-120 (in Chinese).
- [4] 张哲,李军,高乃云. 建筑内水环境卫生安全研究——坐便器横支管管径与坡度对输送距离的影响[J]. 城市住宅, 2015(2): 29-33.  
ZHANG Zhe, LI Jun, GAO Naiyun. Study on health safety of water environment in building—influence of horizontal drainage pipe diameter and gradient on human excreta transmission distance [J]. City & House, 2015(2): 29-33 (in Chinese).
- [5] GORMLEY M, CAMPBELL D P. The transport of discrete solids in above ground near horizontal drain age pipes: a wave speed dependent model [J]. Building and Environment, 2006, 41(4): 534-547.
- [6] 郑承军. 真空抽吸式卫生系统实验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008: 13-15.  
ZHENG Chengjun. A Study on the New-developed Vacuum Sanitation System [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2008: 13-15 (in Chinese).
- [7] DAVIES J W, BUTLER D, SMALL J L, et al. Gross solids transport and degradation [J]. Water Science & Technology, 1998, 37(1): 61-68.
- [8] KOBAYASHI N, OTSUKA M. A study on the



- evaluation of a super water-saving toilet in regard to the drainage performance thereof in the house drain section [C]//CIB. Proceedings of International Building and Construction Research and Innovation Council-Building Water Supply and Drainage Executive Committee (CIB W062). USA:CIB, 2012:277-288.
- [9] 翟立晓. 坐便器排水横管水力性能研究[D]. 北京: 北京建筑工程学院, 2011:36-39.  
ZHAO Lixiao. Research on Hydraulic Performance of Toilet Drainage Horizontal Pipe [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2011: 36-39 (in Chinese).
- [10] MCDOUGALL J A, SWAFFIELD J A. The influence of water conservation on drain sizing for building drainage systems [J]. Building Services Engineering Research & Technology, 2003,24(4):229-243.
- [11] SWAFFIELD J A. Closure—dry drain forum [EB/OL]. [2020-11-05]. <https://www.map-testing.com/assets/files/DryDrainsForum-2009-Dr.Swoffield-pt2-closing.pdf>.
- [12] 住房和城乡建设部. 室外排水设计规范:GB 50014—2006 [S]. 2016年版. 北京:中国计划出版社, 2016.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Code for Design of Outdoor Wastewater Engineering: GB 50014-2006 [S]. 2016 ed. Beijing: China Planning Press, 2016(in Chinese).
- [13] MCDOUGALL J A, SWAFFIELD J A. Transport of deformable solids within building drainage networks [J]. Building Research & Information, 2007, 35 (2): 220-232.
- [14] Masayuki Otsuka, 张哲, 赵珍仪, 等. 节水型坐便器排水横支管的输送性能研究[J]. 中国给水排水, 2015, 31(23):150-154.  
MASAYUKI Otsuka, ZHANG Zhe, ZHAO Zhenyi, *et al.* Study on carrying performance of horizontal drain branch of water-saving toilet [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(23): 150-154 (in Chinese).
- [15] 张哲, 赵珍仪, 黄鋆尧, 等. 介护坐便器重力流管道的搬送性能研究[J]. 中国给水排水, 2017, 33(19): 130-133, 137.  
ZHANG Zhe, ZHAO Zhenyi, HUANG Junyao, *et al.* Gravity flow pipeline transportation capability of nursing toilets[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(19): 130-133, 137 (in Chinese).
- [16] MCDOUGALL J A, SWAFFIELD J A. Assessment of WC performance using computer-based prediction techniques[C]//CIB. Proceedings of CIB W062 Symp on Water Supply and Drainage for Buildings. Brighon: CIB, 1994.
- [17] DEMARCO P, KOELLERETAL J. The Drainline Transport of Solid Waste in Buildings [M]. USA: Plumbing Efficiency Research Coalition, 2012.
- [18] DEMARCO P, KOELLERETAL J. The Drainline Transport of Solid Waste in Buildings—Phase 2.0 [M]. USA: Plumbing Efficiency Research Coalition, 2015.
- [19] 黄鋆尧. 基于既有住宅排水系统的适老坐便器排水管道系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018:19-21.  
HUANG Junyao. The Research on the Drainage Pipe System of Suitable Old Toilet Seat Based on Existing Residential Drainage System [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018:19-21 (in Chinese).
- [20] 龚旭. 建筑排水系统水力实验与数值模拟研究[D]. 福州: 福州大学, 2015:51-54.  
GONG Xu. Hydraulic Experiment and Numerical Simulation Research of Building Drainage System [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2015:51-54 (in Chinese).
- [21] GORMLEY M, CAMPBELL D P. The effects of surfactant dosed water on solid transport in above ground near horizontal drainage systems [J]. Building and Environment, 2007,42(2): 707-716.
- [22] CAMPBELL D, MUSHIN S, SAUNDERS C. The development of a simulated sediment dosing apparatus for deposition research in wastewater collection systems [J]. Journal of Water Resource and Protection, 2018, 10 (5):493-506.
- [23] NIEUWENHUIS E, LANGEVELD J, CLEMENS F. The relationship between fat, oil and grease (FOG) deposits in building drainage systems and FOG disposal patterns [J]. Water Science & Technology, 2018, 10: 2388-2396.

作者简介:刘壮壮(1995—),男,河南济源人,硕士研究生,研究方向为建筑给排水理论与技术。

E-mail:1650374123@qq.com

收稿日期:2020-12-05

修回日期:2020-12-31

(编辑:丁彩娟)