

采用能量平衡黏附理论的灌水器 泥沙-壁面黏附特性研究

刘霞, 魏正英, 王立朋, 唐一平

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了从量化的角度评价灌水器的抗堵性能, 从单个沙粒的角度, 分析了其在滴灌灌水器迷宫流道内的行为, 建立了基于能量平衡的颗粒黏附模型, 并计算出黏附临界速度. 通过粒子图像测速可视化试验与计算流体动力学数值模拟相结合的方法, 对采用能量平衡的黏附理论模型进行了适用性验证. 研究发现, 当灌水器入口压力越大、颗粒粒径越大或者颗粒-壁面间的界面能越小时, 颗粒越难与壁面发生黏附, 因此灌水器的易堵塞位置与灌溉水中的颗粒粒径级配有关.

关键词: 灌水器; 黏附; 能量平衡; 数值模拟

中图分类号: S275.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)10-0115-07

Particle-Wall Adhesion Behavior in Labyrinth Emitter Obeying Energy Balanced Adhesion Theory

LIU Xia, WEI Zhengying, WANG Lipeng, TANG Yiping

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Aiming at quantitatively analyzing the emitter anti-clogging performance, the clogging mechanism of the emitter is analyzed for the interaction perspective as single sand contacts with the emitter channel-wall, and an adhesion model based on energy balance is established. A critical velocity, for justifying particle-wall adhesion appearing, is extracted. Particle imaging velocity visualized experiments and computational fluid dynamic numerical simulations are carried out to verify the applicability of the adhesion model, and the results demonstrate that the particle is more difficult to adhere to the emitter channel wall in case of larger inlet pressure, larger particle diameter or smaller interface energy; and the particle distribution affects the emitter clogging position obviously.

Keywords: emitter; adhesion; energy balance; numerical simulation

灌水器是滴灌系统重要的终端设备, 由于灌水器流道的特征尺寸一般为 1 mm 左右, 并且有向更小尺寸发展的趋势, 因此出水流量很小, 一般单个灌水器的流量只有 2~8 L/h. 灌水器容易发生堵塞, 从而导致整个滴灌系统瘫痪. 据有关研究表明, 即使在水质良好的条件下, 采用较为完善的过滤措施, 滴灌系统仍有 1/3 的物理堵塞^[1]. 然而, 对灌水器堵塞

机理的研究, 目前还处于探索阶段. 近年来, 国内外学者应用各种方法对灌水器的堵塞进行了研究^[2-6], 但均未全面考虑颗粒与壁面、颗粒与颗粒的黏附作用. 陈惜民等人^[7-11]对多种黏附现象的黏附机理进行了研究, 但对于迷宫流道内的黏附机理则研究得甚少. 曹蒙^[12]考虑了颗粒的黏性, 针对滴灌灌水器迷宫流道内的黏附现象进行了研究分析, 但其所建

收稿日期: 2011-01-09. 作者简介: 刘霞(1986—), 女, 硕士生; 魏正英(联系人), 女, 教授. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50675172); 国家“863 规划”资助项目(2006AA100214-5); 全国博士学位论文作者专项基金资助项目(200740).

网络出版时间: 2011-08-20

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20110820.1055.005.html>

立的力学模型忽略了颗粒所具有的原始动能对黏附的影响,对黏附发生位置的判断存在不妥之处.本文从颗粒在灌水器流道内的黏附入手,着重对灌水器中颗粒与流道壁面的黏附规律进行了研究.

1 颗粒-壁面间的黏附理论

灌溉水经过滤后,仍然会含有粒径小于 $76\ \mu\text{m}$ 的泥沙细颗粒^[13],由于泥沙所具有的微小粒径长期在水中所发生的物理化学作用,以及水中微生物的作用等,因此会使这些泥沙具有一定的黏性.由于迷宫流道结构的复杂性,当这些黏性泥沙进入灌水器后将会产生复杂的运动行为.当黏性泥沙与灌水器流道壁面相互作用时,泥沙可能会与壁面发生碰撞后反弹,再次进入主流区,也可能会黏附于流道壁面上,这些黏附于流道壁面上的颗粒转化成新的流道壁面,在流道壁面与未黏附颗粒时的流道壁面上表现出不同的性质.黏附于流道壁面上的颗粒使得流道的通流截面减小,随着时间的积累,黏附于流道壁面上的泥沙颗粒越聚越多,最终将会导致灌水器的堵塞.因此,从单个颗粒与壁面相互作用的角度来研究颗粒与壁面之间的相互作用,建立黏性泥沙与流道壁面间的黏附模型,可以更好地研究灌水器的堵塞现象.

随灌溉水进入灌水器中的沙粒,由于受到灌溉水中物理化学作用的影响,且这些沙粒的粒径都很小($<76\ \mu\text{m}$),因此具有较大的比表面积,使得沙粒表面的物理化学作用不容被忽视.在颗粒与壁面的碰撞恢复阶段,颗粒要受到颗粒-壁面间黏附力的束缚,而黏附功 E_s 在此过程中对颗粒做负功^[14].

本文给出了颗粒与壁面碰撞后发生反弹的临界条件,忽略了颗粒壁面之间的摩擦以及颗粒壁面碰撞过程中表面能的变化,颗粒与壁面碰撞前,具有一个初始动能 E_k ,当 E_k 克服颗粒-壁面间的黏附功时,颗粒将在碰撞后发生反弹,再次脱离壁面进行运动.反之,当 E_k 不能克服颗粒-壁面间的黏附功时,颗粒将与壁面发生黏附,滞留在壁面上.忽略颗粒-壁面间的摩擦以及颗粒-壁面碰撞过程中表面能的变化,给出如下的颗粒初始动能与颗粒-壁面间黏附功的能量平衡方程

$$E_s = E_k \quad (1)$$

$$E_k = \frac{1}{2}m_p u_p^2; \quad E_s = \pi R_0^2 \gamma \quad (2)$$

式中: m_p 为颗粒的质量; u_p 为颗粒的速度; γ 为相互作用的两颗粒间的界面能; R_0 为考虑颗粒-壁面间

黏附力时的接触半径

$$R_0^3 = 6\pi\gamma R^2/K \quad (3)$$

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}; \quad K = \frac{4E}{3}; \quad \frac{1}{E} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (4)$$

其中 R 为有效颗粒半径, E 为有效弹性模量, ν_1 、 ν_2 、 E_1 和 E_2 分别为颗粒与壁面的泊松比和剪切模量, R_1 、 R_2 分别为 2 个相互接触颗粒的半径.

采用颗粒黏性的 JKR 理论^[15],对颗粒-壁面间的黏附功进行了计算.通过式(1)~式(4),得到颗粒与壁面碰撞后发生黏附的临界速度

$$u_c = u_p = \left(\frac{2\pi\gamma(6\pi\gamma R^2)^{2/3}}{m_p K^{2/3}} \right)^{1/2} \quad (5)$$

当 $u_p \leq u_c$ 时,颗粒与壁面将发生黏附;反之,颗粒与壁面碰撞后将发生反弹,并继续随流体运动.由式(5)可知,颗粒与壁面相互作用的表面能对颗粒与壁面的黏附过程影响显著,在颗粒-水-壁面所组成的系统中,计算颗粒与灌水器流道壁面相互作用的表面能非常困难,而且也难以测量.因此,需考虑各种不同表面能的影响后,分析比较表面能对结果的影响,然后通过黏附可视化试验所得结果对模拟结果进行验证,找出最符合试验结果的表面能作为以后模拟的参数.

考虑到黏附试验的可视化(不能观测颗粒在壁面上的累加效果)和颗粒与 2 种壁面(颗粒在壁面上黏附累加前、后的壁面)发生黏附的相似性,此处仅对尚未发生颗粒在壁面累加的情况进行数值分析.当沙粒的主要成分为 SiO_2 时,取 $\nu_1 = 0.17$, $E_1 = 75\ \text{GPa}$;当试验件为有机玻璃(PMMA)时,取 $\nu_2 = 0.37$, $E_2 = 3.2\ \text{GPa}$.

图 1 为不同颗粒粒径时,界面能对颗粒黏附临界速度的影响.由图可知,颗粒粒径越小,颗粒-壁面间的界面能就越大,而颗粒-壁面间发生黏附的临界速度越小,颗粒则越容易黏附于流道壁面.

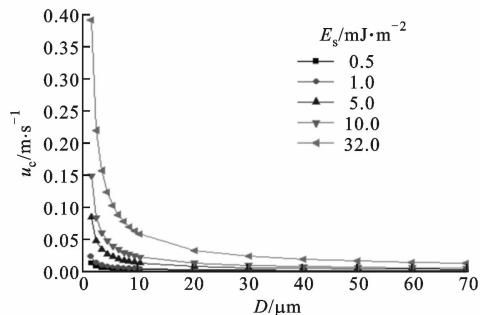


图 1 黏附临界速度与界面能和粒径间的关系

2 PIV 可视化实验

为了对所建立的能量平衡颗粒-壁面间黏附模型的适用性进行验证,分别对矩形迷宫流道、三角形迷宫流道和梯形迷宫流道的灌水器进行了 PIV 可视化试验,并对其在不同灌水器入口压力 P 下的壁面黏附情况进行了观测和分析。

2.1 试验平台的搭建

灌水器迷宫流道流动特性的 PIV 可视化试验台如图 2 所示,主要由高速摄像机、高压球形氙灯、计算机、示踪粒子、压力表组成。TroubleShooter 高速摄像仪和 6 000 倍显微镜头,可将 1 mm^2 的微尺度迷宫流道结构放在一个视场中,高速摄像仪可通过 USB2.0 接口与电脑方便地连接,以进行流场测量数据的分析处理。

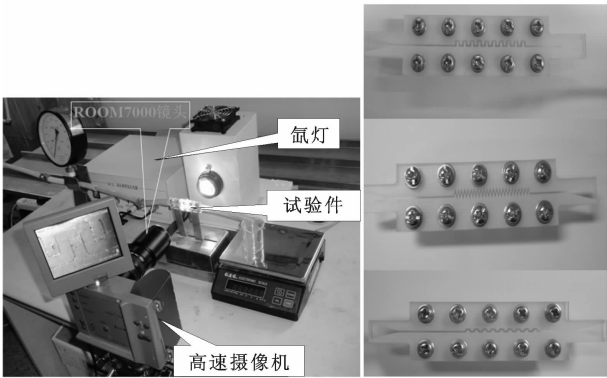
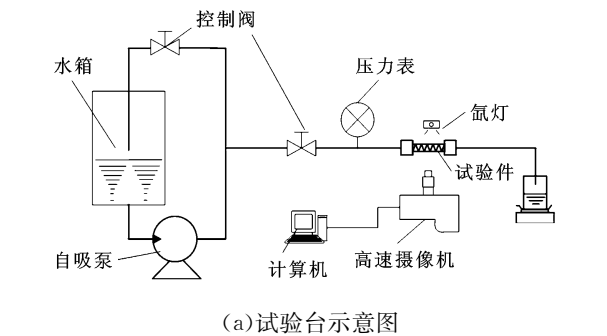


图 2 微流道 PIV 可视化试验台及试验件

2.2 试验结果分析

在 P 为 10 kPa 时,分别对泥沙颗粒和镁粉颗粒进行黏附试验观测,试验中采用的泥沙颗粒和镁粉颗粒经 220 目筛网过滤,其粒径 $D\leq 70\text{ }\mu\text{m}$ 。试验发现,2 种颗粒在灌水器流道内具有相似的黏附趋势,但镁粉颗粒较泥沙颗粒的黏附容易得多,试验进行到 4 h 时,泥沙颗粒在灌水器内的黏附依然较弱,而

镁粉在 2 h 后就有很程度的黏附发生. 为缩短试验时间,采用镁粉颗粒代替泥沙颗粒进行试验,选取一个单元流道作为观察对象,对不同时刻下的壁面黏附情况进行记录. 试验开始时,流道壁面无任何黏附,但随着试验的进行,在流道侧壁出现了颗粒的黏附. 在试验过程中,无法对流道上、下壁面进行观察,当试验结束后,拆开试验件可见流道壁面也发生了不同程度的黏附。

由图 3 可见,随着 P 的增大,流道前后壁面上黏附程度的变化也增大,且 P 越大,黏附程度越小. 由于 P 越小,黏附越易发生,因此在 P 为 10 kPa 时,对微流道在同一时间(90 min)的黏附程度进行了比较. 由图 4 可见,在同一时刻,处于不同位置的流道单元的黏附程度不尽相同,即流道单元所处位置与黏附程度密切相关. 从图 4 中还可观察到,黏附现象较易发生的位置为流道单元外侧拐角处。

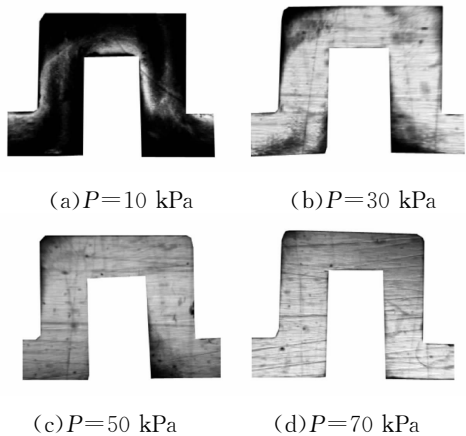


图 3 灌水器入口压力对流道黏附的影响

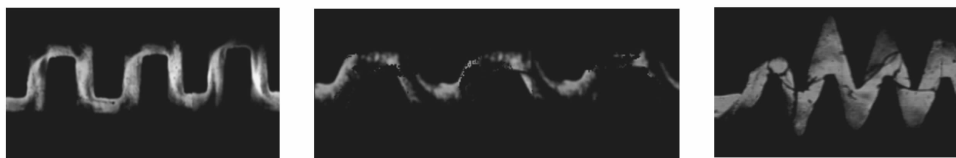
3 数值模拟及结果分析

将基于能量平衡的黏附模型与 FLUENT 模拟软件相结合,分别对 3 种迷宫流道进行了水沙两相流模拟,并与试验结果进行了对比分析,验证了黏附模型的适用性。

3.1 数值模拟方法

基于颗粒-壁面间的黏附理论模型,采用用户自定义函数(UDF)编程,并将其载入 FLUENT 模拟软件,对灌水器矩形流道内的微颗粒-壁面间的黏附进行了离散相模拟。

(1)对矩形流道的连续相进行求解,数值模拟采用 $k-\epsilon$ RNG 湍流模型,靠近壁面区采用标准壁面函数,边界条件设为进出口压力边界. 压力速度耦合采用 SIMPLE 算法,用二阶离散格式进行离散,收敛精度为 10^{-4} 。



(a)矩形流动

(b)梯形流动

(c)三角形流动

图4 流动单元所处位置与颗粒-壁面间黏附的关系

(2)进行离散相的加载,设定面射流源,入射颗粒数为200个,重复入射5次.对所编写的黏附模型程序进行加载.最后,进行离散相的计算,通过UDF程序输出黏附于壁面上的颗粒信息(见图5).

(3)对所得模拟结果进行归纳整理,并采用MATLAB软件对数据进行后处理.

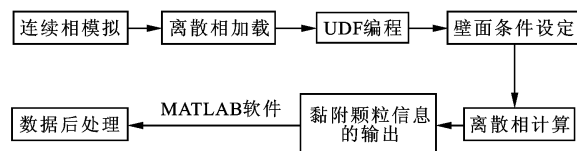


图5 基于黏附模型的CFD数值模拟流程

3.2 黏附模型适用性验证

为验证黏附模型的适用性,分别对灌水器入口压力对颗粒-壁面间黏附的影响、流动单元位置与颗粒-壁面间黏附程度的关系以及迷宫流动易发生黏附的位置进行了模拟分析,设总黏附率为 R_t ,单元黏附率为 R_u .

3.2.1 灌水器入口压力对颗粒-壁面间黏附的影响
在相同颗粒-壁面间的界面能(0.010 J/m^2)、颗粒粒径(0.005 mm)、不同灌水器前段压力(分别为 $10 \sim 70 \text{ kPa}$)的条件下,分别对3种迷宫流动进行数值模拟,并对黏附颗粒信息进行了统计分析.由图6可见,在 P 由 10 kPa 增大到 40 kPa 时,各流道的 R_t 大幅度地降低,三角形迷宫流道的 R_t 由 67% 降至 15% ,矩形迷宫流道的 R_t 由 50% 降至 5% ,梯形迷宫流道的 R_t 由 25% 降至 3% .可见, P 越大颗粒越不容易与壁面发生黏附,这与试验结论具有一致性. P 越大,流动内的水流速度也越大,由于颗粒速度的跟随性,颗粒的速度也越大,因此碰撞前的颗粒具有相对较大的动能,易于在碰撞后脱离壁面继续运动.

3.2.2 流动单元位置与颗粒-壁面间黏附程度的关系
本文分别对不同粒径的入射颗粒进行了两相流数值模拟,并对黏附颗粒在流动各单元内的分布情况进行了对比分析.图7为入射颗粒粒径分别 $1 \mu\text{m}$ 和 $10 \mu\text{m}$ 时,黏附颗粒在3种迷宫流动中各单元内的分布情况.

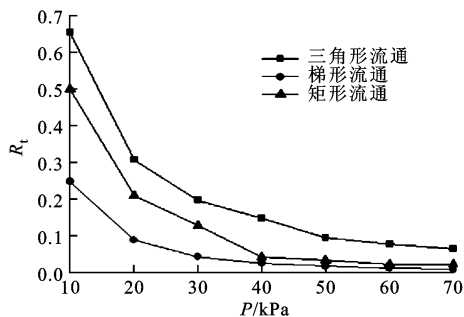
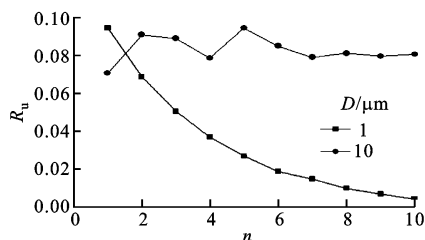
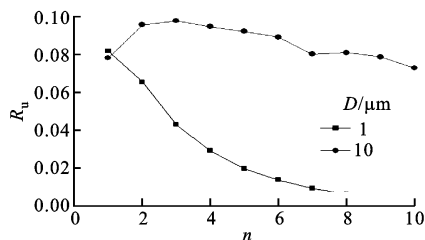


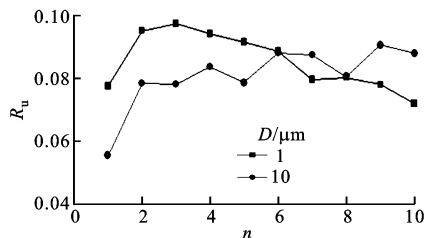
图6 灌水器入口压力与颗粒-壁面总黏附率的关系



(a)矩形流动



(b)梯形流动



(c)三角形流动

图7 已黏附颗粒在灌水器各流道内的分布情况

图7中3种迷宫流动中的现象看似有很大不同,但实际上却存在一个相同的规律:随着入射颗粒粒径的增大,黏附颗粒的主要分布位置具有逐渐后移的趋势.对于较小的颗粒,因其与壁面间的黏附能相对于本身所具有的动能来说较大,颗粒较易在碰

撞后失去全部动能而黏附于壁面上,因此在灌水器前端,多数颗粒的动能已不足以挣脱颗粒-壁面间黏附功的束缚而黏附于壁面.相反,对于粒径较大的颗粒来说,其颗粒-壁面间的表面能相对于颗粒具有的动能较小,颗粒要达到与壁面发生黏附的条件所需的碰撞次数增多,因此颗粒在灌水器内的运动距离增加,易于发生颗粒-壁面间黏附的位置渐渐向灌水器后端推移.

3.2.3 迷宫流道易发生黏附的位置 利用 MATLAB 软件分别对模拟中的颗粒信息进行处理,得到黏附颗粒在流道壁面上的分布情况,如图 8、图 9 所示.对图 8、图 9 中 3 种流道内的黏附颗粒分布情况分别进行对比,发现不同粒径的颗粒在流道壁面上的黏附区域具有很大差异.图 10 为将不同粒径的颗粒进行叠加后得到的结果,可见与试验结果(见图 10a~c)不完全吻合.由于试验中所用颗粒级配尚未确定,与模拟结果(见图 10d~f)的粒径级配可能存在差异,而实际的颗粒级配应是连续的,但模拟中的颗粒级配则为分段形式,因此此处黏附模型的适用性仍然成立.由图 7~图 10 的分析可知,颗粒的粒径级配对迷宫流道发生堵塞的位置具有重要影响.

3.3 灌水器堵塞影响因素的进一步分析

由于模拟结果与试验结果在很大程度上具有一致性,因此验证了颗粒-壁面间黏附理论模型的适用性.图 11 表明,3 种形式的迷宫流道表现出一个相同的现象,即颗粒粒径越小, R_t 越大,大颗粒越易黏附于流道壁面.根据颗粒的黏性及黏附模型,认为颗粒粒径越小,比表面积越大,颗粒的物理化学作用就越明显,则颗粒-壁面间的黏附能相对于颗粒的动能所起的作用就越大.因此,当小粒径颗粒较大时,颗粒容易与流道壁面发生黏附.

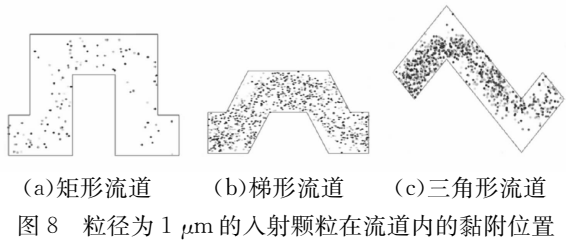


图 8 粒径为 1 μm 的入射颗粒在流道内的黏附位置

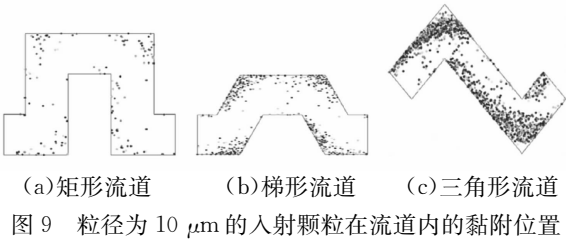


图 9 粒径为 10 μm 的入射颗粒在流道内的黏附位置

通过分别改变颗粒与壁面间的界面能和灌水器的入口压力,并对其进行黏附情况的模拟和分析,得到了如图 12 所示的结果.分别对比 P 为 10、30 kPa 时的颗粒-壁面间黏附率可以发现: $E_s=0.001\text{ J/m}^2$ 时,灌水器的最大压力敏感度为 0.776(入射颗粒粒径为 0.001 mm),敏感性较大;在 $E_s=0.015\text{ J/m}^2$ 时,灌水器的最大压力敏感度仅为 0.186,敏感性较小.在 $E_s=0.005\text{ J/m}^2$ 、 0.010 J/m^2 时,灌水器的最大压力敏感度分别为 0.607 和 0.358.可见,颗粒-壁面间的界面能越大, P 的敏感性越小.

如图 12 所示,当颗粒-壁面间的界面能越大时(其他条件完全相同),颗粒与流道壁面间的黏附程度越高,即颗粒-壁面间的界面能越大,颗粒就越容易黏附于灌水器流道壁面.由图 12d 可知,将 E_s 设定为 0.015 J/m^2 、 P 为 10 kPa 时, R_t 达到了 95% 以上,可见颗粒-壁面间的界面能对黏附具有非常重要的影响.

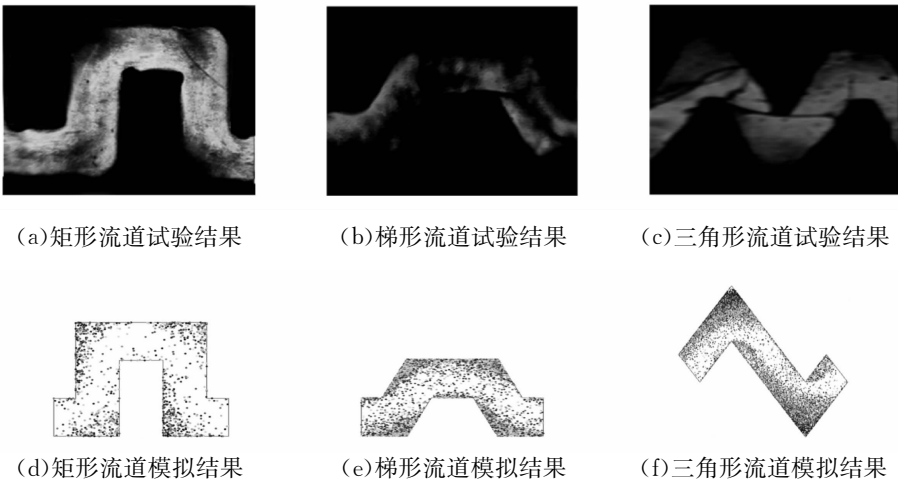


图 10 颗粒黏附的模型及试验结果

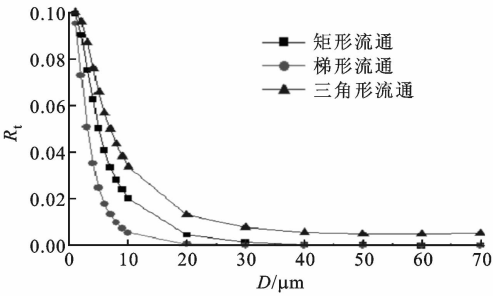
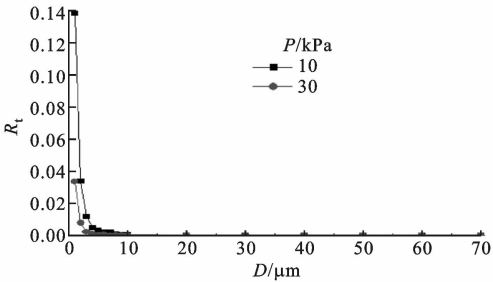
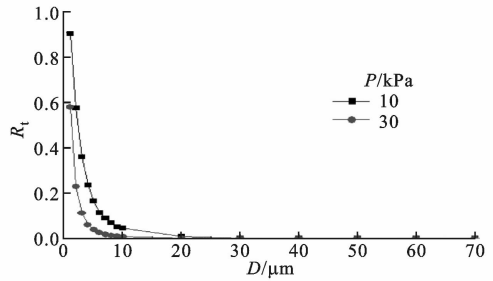


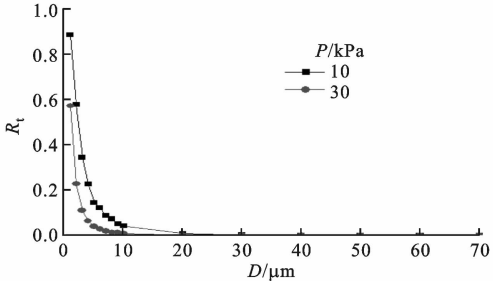
图 11 颗粒粒径与黏附程度的关系



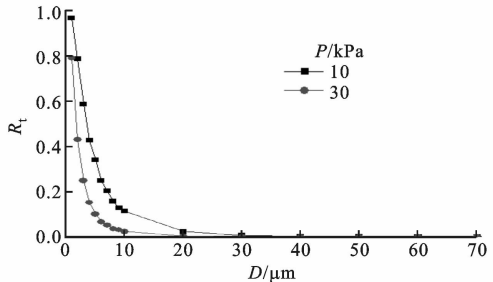
(a) $E_s=0.001\text{ J/m}$



(b) $E_s=0.005\text{ J/m}$



(c) $E_s=0.010\text{ J/m}$



(d) $E_s=0.015\text{ J/m}$

图 12 颗粒-壁面间的界面能对灌水器入口压力敏感性的影响

4 结 论

本文从单颗粒的角度入手,考虑颗粒的黏性后,采用基于能量平衡的黏附理论模型,给出了黏性颗粒与壁面发生黏附时的临界速度的计算方法.通过试验和模拟验证了黏附模型的适用性,并得到了如下结论.

(1)给出了判别颗粒与流道壁面发生黏附与否的标准,即黏附临界速度.

(2)通过 PIV 可视化试验,验证了黏附模型的适用性.

(3)灌水器入口压力对颗粒-壁面间的黏附影响显著,随着灌水器入口压力的增大,在相同的条件下,颗粒在流道壁面上的黏附量越少,颗粒就越不容易与壁面发生黏附.

(4)对于不同粒径的入射颗粒,在迷宫流道的不同位置发生黏附的程度不同,因此灌水器在迷宫流道内先发生堵塞的位置会因灌溉水的差异而不同.

(5)黏性颗粒与流道壁面间的表面能是影响颗粒-壁面黏附的重要因素,在同一压力下,对于粒径相同的颗粒,表面能越大,颗粒与壁面碰撞后越容易黏附于壁面上,且颗粒粒径越小,表面能对黏附的影响越显著.

参考文献:

[1] 杜敏,范兴科,吴普特. 滴头堵塞研究现状及预防措施[J]. 农机化研究,2004,3(2):110-111.
DU Min, FAN Xingke, WU Pute. Research on the clogging of dripper and measure of prevention[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2004, 3(2): 110-111.
[2] 魏正英,赵万华,唐一平,等. 滴灌灌水器迷宫流道主航道抗堵设计方法研究[J]. 农业工程学报,2005,21(6):1-7.
WEI Zhengying, ZHAO Wanhua, TANG Yiping, et al. Anti-clogging design method for the labyrinth channels of drip irrigation emitters[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 3(2): 110-111.
[3] 牛文全,喻黎明,吴普特,等. 迷宫流道转角对灌水器抗堵塞性能的影响[J]. 农业机械学报,2009,40(9):51-55.
NIU Wenquan, YU Liming, WU Pute, et al. Influence of angle of labyrinth channels on anti-clogging performance of emitter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(9):

- 51-55.
- [4] RAVINA I, PAZ E, SOFER Z, et al. Control of clogging in drip irrigation with stored treated municipal sewage effluent [J]. *Agricultural Water Management*, 1997, 33: 127-137.
- [5] CARARO D C, BOTREL T A, HILLS D J, et al. Analysis of clogging in drip emitters during wastewater irrigation [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2006, 22(2): 251-257.
- [6] 喻黎明. 滴灌灌水器水力特性及抗堵塞研究 [D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2009.
- [7] 陈惜明, 赵跃民, 朱红, 等. 潮湿细粒物料筛分过程中黏附理论的研究 [J]. *江苏煤炭*, 2003(4): 38-40.
- CHEN Ximing, ZHAO Yuemin, ZHU Hong, et al. Study on adhesive mechanism in screening fine moist material [J]. *Jiangsu Coal*, 2003(4): 38-40.
- [8] MITTAL K L. Particles on surfaces 2: detection, adhesion, and removal [M]. New York, USA: Plenum Press, 1989: 3-17.
- [9] JOHNSON K L, KENDALL K, ROBERTS A D. Surface energy and the contact of elastic solids [EB/OL]. (2010-11-20)[2010-12-25]. <http://rspa.royalsocietypublishing.org/content/324/1558/301.full.pdf+html>.
- [10] ZHANG Xiangrong, WANG Lianze, ZHU Keqin. A simple criterion for particle-wall adhesion in a wire-plate electrostatic precipitator [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2005(36): 411-417.
- [11] 任露泉, 陈德兴, 胡建国, 等. 仿生推土板减粘降阻机理初探 [J]. *农业工程学报*, 1990, 6(2): 13-20.
- REN Luquan, CHEN Dexing, HU Jianguo, et al. Initial exploring for mechanism of decreasing resistance and reducing adhesion of the bionic bulldozing plates [J]. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1990, 6(2): 13-20.
- [12] 曹蒙. 灌水器微流道中颗粒与壁面黏附性能仿真与实验研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2010.
- [13] FORD R J. The effect of shading and crop load on flavour and aroma compounds in Sauvignon blanc grapes and wine [D]. Canterbury, England: Lincoln University, 2007.
- [14] ZHANG Xiangrong, WANG Lianze, ZHU Keqin. Particle tracking and particle-wall collision in a wire-plate electrostatic precipitator [J]. *Journal of Electrostatics*, 2005(63): 1057-1071.
- [15] 孙其诚, 王光谦. 颗粒物质力学导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 20-22.

[本刊相关文献链接]

轴流式血泵水动力特性和生物相容性的数值模拟. 西安交通大学学报, 2011, 45(8): 118-122.

超临界汽轮机中压透平级流动传热特性研究. 西安交通大学学报, 2011, 45(7): 9-14.

旋风式油气分离器数值模拟与实验研究. 西安交通大学学报, 2011, 45(7): 55-59.

空气环境中水滴和半空间弹性体撞击力学行为的数值模拟. 西安交通大学学报, 2011, 45(5): 102-107.

载细胞水凝胶体系中微通道结构对营养物质输送能力的影响. 西安交通大学学报, 2011, 45(4): 115-120.

迷宫密封泄漏特性的试验研究. 西安交通大学学报, 2011, 45(3): 48-52.

轴流式血泵黏弹性流体水动力特性数值模拟. 西安交通大学学报, 2010, 44(11): 28-32.

沙尘微粒在硅橡胶绝缘材料表面的沉降模型. 西安交通大学学报, 2009, 43(12): 86-90.

滴头壁面形貌对微颗粒与壁面黏附特性的影响. 西安交通大学学报, 2009, 43(9): 120-124.

旋转矩形通道内湍流雷诺应力分析. 西安交通大学学报, 2009, 43(7): 6-10.

正方形截面直通通道内二次流现象的实验研究. 西安交通大学学报, 2009, 43(7): 83-87.

发动机冷却液流动与传热的数值模拟. 西安交通大学学报, 2009, 43(3): 17-21.

求解对流换热反问题的低阶模型. 西安交通大学学报, 2009, 43(3): 14-16.

滴头壁面形貌对微颗粒与壁面黏附特性的影响. 西安交通大学学报, 2009, 43(9): 120-124.

一种新的喷射器模型及其实验验证. 西安交通大学学报, 2008, 42(9): 1096-1101.

环己烷连续脱氢反应研究. 西安交通大学学报, 2007, 41(12): 1495-1498.

基于正交试验的迷宫流道灌水器参数化设计研究. 西安交通大学学报, 2006, 40(1): 31-35.

(编辑 管咏梅)