

微孔陶瓷灌水器流量影响因素研究

李向明 杨建国

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 制备了3种孔径相同但开口孔隙率不同的粘土基微孔陶瓷,将3种微孔陶瓷加工成圆片并分别组装成灌水器,以灌水器的水力性能研究为基础,详细讨论了灌溉系统的水头以及微孔陶瓷片厚度和开口孔隙率对灌水器流量的影响。结果表明,微孔陶瓷灌水器的流量与灌溉系统的水头呈正比;微孔陶瓷片的厚度和开口孔隙率对灌水器的流量均有影响,其中开口孔隙率的影响最大,厚度的影响次之;由于微孔陶瓷的渗透系数与开口孔隙率满足幂函数关系,故随着微孔陶瓷开口孔隙率的增大,灌水器的流量呈幂函数快速增大;随着微孔陶瓷片厚度的增加,灌水器的流量缓慢降低。

关键词: 微孔陶瓷; 开口孔隙率; 灌水器; 渗透系数

中图分类号: S275 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)04-0073-06

Factors Influencing Flow Rate of Microporous Ceramic Irrigation Emitters

Li Xiangming Yang Jianguo

(College of Water Resources and Architecture Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Three microporous clay ceramics with uniform microstructure, adequate flexure strength of 11 ~ 23 MPa, the same pore size about 4.2 ~ 4.6 μm and different open porosities of 37%, 44% and 51% were fabricated from the powder blend of clay and slag by sintering. The microporous ceramics were machined into circular specimens, and then microporous ceramic irrigation emitters were assembled by installing the circular microporous ceramic specimens in plastic casings. By testing the hydraulic performance of the irrigation emitters, the effects of thickness and open porosity of microporous ceramic specimens and water head in irrigation pipeline on flow rate of irrigation emitters were discussed in detail, and then the relationships among flow rate of irrigation emitters, thickness and open porosity of microporous ceramic specimens as well as the water head in irrigation pipeline were fitted. According to the testing results, the flow rate of irrigation emitters was proportional to the water head in irrigation pipeline, and the linear relationship was not affected by thickness and open porosity of microporous clay ceramics. The thickness and open porosity of the microporous ceramic specimens had great effect on the flow rate of irrigation emitters. As the thickness of microporous ceramic specimens was increased, the flow rate of irrigation emitters was decreased gradually. Due to the power function relationship between the hydraulic conductivity and open porosity of microporous ceramics, the flow rate of irrigation emitters was increased exponentially with the increase of open porosity of microporous ceramics. As demonstrated from the result in this work, the microporus clay ceramics are promising for manufacturing irrigation pitchers and units for water seepage and filtration.

Key words: microporous ceramic; open porosity; irrigation emitters; hydraulic conductivity

收稿日期: 2015-10-30 修回日期: 2015-11-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479172, 51209177)、国家自然科学基金陕西省配套项目、陕西省水利科技项目(2015slkj-10、2011slkj-05)和西北农林科技大学基本科研业务专项(2452015368)

作者简介: 李向明(1981—),男,副教授,博士,主要从事节水灌溉新材料研究, E-mail: li_xiangming1981@126.com

通信作者: 杨建国(1963—),男,副教授,主要从事农村供排水与灌溉工程技术研究, E-mail: yjg632003@nwsuaf.edu.cn

引言

渗灌是一种传统但节水效果显著的灌溉方法,具有节水效率高、生产成本低、抗堵塞等优点,被广泛用于干旱和半干旱地区^[1-6]。微孔陶瓷内部存在大量的微孔,这些微孔彼此连通形成的微孔道具有很好的毛细作用^[7-8],能够将接触到微孔陶瓷的灌溉水迅速吸入到微孔陶瓷内部的微孔道中。由于微孔陶瓷内部的孔径很小,会对在微孔道中流动的水产生很大的阻力,而且孔径越小,阻力越大,因此微孔陶瓷对灌溉系统中的有压水流具有很好的消能作用,灌溉水经微孔陶瓷消能后可稳定入渗到土壤中。实际上,微孔陶瓷应用于渗灌由来已久,早在两千多年前,中国就有关于微孔陶瓷渗灌的记载^[1],当时的渗灌多以陶罐、瓦管和陶土头等作为终端渗水装置^[9-14],灌溉水通过这些装置内部相互连通的微孔渗出,直接向作物根系附近土壤供水。

近几年,随着微孔陶瓷在渗灌领域的应用逐渐被认可,国外一些学者对影响微孔陶瓷渗水性能的因素进行了探索研究,并得出了一些初步结论。通过对多孔陶瓷管和陶罐的水力性能研究发现,微孔陶瓷的渗水速率受微孔陶瓷厚度、渗流面积和渗透系数的共同影响,且微孔陶瓷的渗透系数是影响微孔陶瓷渗水速率的主要因素^[12-14]。一些学者基于分形几何理论推导出渗透系数与分形维数、开口孔隙率和孔径的函数关系,得出微孔陶瓷的渗透系数主要依赖于其开口孔隙率和孔径^[15-20]。截至目前,关于微孔陶瓷的渗透系数和开口孔隙率关系的理论研究虽有少量报道,但由于渗灌用微孔陶瓷的规范化制备工艺一直未得到重视,基于实验的相关研究难以开展,因此关于微孔陶瓷开口孔隙率和厚度以及灌溉水头对灌水器流量的综合影响规律仍不明确。

一般来说,采用常规烧结工艺制备的微孔陶瓷的孔径均为微米级,但原料成分和制备工艺对微孔陶瓷的开口孔隙率影响却很大^[21-23]。因此,相对于变化微小的孔径,研究开口孔隙率对渗透系数的影响更有必要。为了准确研究微孔陶瓷开口孔隙率和厚度对微孔陶瓷灌水器流量的影响规律,尽量排除微孔陶瓷孔径变化以及灌水器形状差异对研究结果的影响,应先制备出孔径相同而开口孔隙率有所差异的微孔陶瓷。近两年,笔者探索出了多套渗灌用粘土基微孔陶瓷的规范化制备工艺,其中以粘土为主要原料,以炉渣为性能改良剂,采用烧结法制备的粘土基微孔陶瓷具有力学性能稳定、开口孔隙率高、制备成本低的优点,非常适合用于制备渗灌灌水

器^[24]。

本文在前期研究的基础上,通过工艺改进,制备3种孔径相同但开口孔隙率不同的粘土基微孔陶瓷;将微孔陶瓷加工成规则的圆片,安装于尺寸完全相同的塑料外壳中,组装成灌水器;以微孔陶瓷灌水器的水力性能研究为基础,讨论微孔陶瓷片开口孔隙率、厚度、渗流面积以及灌溉水头对灌水器流量的影响规律,并尝试拟合灌水器流量与微孔陶瓷片开口孔隙率、厚度、渗流面积以及灌溉水头的函数关系。

1 材料制备与实验方法

1.1 材料制备过程

粘土(SiO_2 质量分数55%以上, Al_2O_3 质量分数35%以上)取自陕西渭河三级阶地,经水洗、干燥、破碎、混合均匀后过80目筛(粒径0~0.178 mm)待用。炉渣取自中国旱区节水农业研究院锅炉房,经水洗、干燥、研磨后过50目筛(粒径0~0.270 mm)待用。将粘土和炉渣按比例混合后置于行星式球磨机中,一部分低速球磨5 h(自转速度180 r/min、公转速度200 r/min),另一部分高速球磨2 h(自转速度360 r/min、公转速度400 r/min)。向原料中加入适量的硅溶胶(SiO_2 质量分数25%,平均粒径8~15 nm),搅拌均匀后,倒入模具中采用10 MPa压力冷压成 $\phi 35\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的坯体。将坯体阴干后放入高温炉中烧结成微孔陶瓷,烧结温度1 050~1 100℃,烧结时间1~2 h。将微孔陶瓷加工成直径为30 mm,厚度分别为4、6、8、10 mm的圆片试样。利用超声波清洗器将圆片试样清洗干净,然后放入塑料外壳中组装成如图1所示的灌水器。

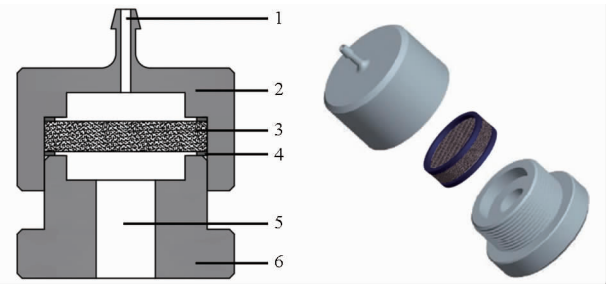


图1 微孔陶瓷灌水器的组装示意图

Fig.1 Assembly schematic diagram of porous ceramic emitters

1. 进水口 2. 上外壳 3. 微孔陶瓷片 4. 密封圈 5. 出水口
6. 下外壳

如图1所示,灌水器由上外壳、下外壳和2个橡胶圈组成,灌水器的上外壳设有进水口,下外壳设有出水口。安装时,微孔陶瓷片置于上外壳和下外壳中间,并由上、下2个橡胶圈进行密封。在进行水力性能测试时,水流由进水口进入灌水器,然后经由微孔

陶瓷片向下方渗流,最后经由灌水器的出水口排出。

1.2 测试指标与实验方法

开口孔隙率采用阿基米德排水法测试,测试结果取 3 个样品的平均值。微观形貌采用扫描电子显微镜 (SEM, S4800 型, Hitachi, 日本) 观察。抗弯强度采用万能试验机 (CMT4204 型, 新三思, 中国深圳) 进行测试, 试样尺寸为 3 mm × 4 mm × 40 mm, 跨距为 30 mm, 加载速度 0.5 mm/min, 测试结果取 3 个样品的平均值。物相成分采用 X 射线衍射仪 (XRD, X' Pert Pro, 飞利浦公司, 荷兰) 进行分析, 扫描角度为 10° ~ 70°, 扫描速度为 5 (°)/min。孔径利用压汞仪 (Poremaster 33 型, 康塔公司, 美国) 进行测试, 测试结果取 3 个样品的平均值。

利用如图 2 所示水力性能测试系统测试微孔陶瓷灌水器的水力性能。测试系统主要由水箱、水泵、变频稳压器、过滤器、压力表、压力传感器、回水管、支管、毛管以及微孔陶瓷灌水器组成。在进行水力性能测试时, 系统中的水头由计算机控制变频稳压器进行调节, 灌水器的流量采用称量法进行测量, 测量时间为 5 min。先对每个灌水器的流量重复测试 3 次取平均值, 作为该灌水器的流量, 然后对所有相同类型灌水器的流量取平均值, 作为该类型灌水器的最终流量, 每种类型的灌水器数量不少于 5 个。

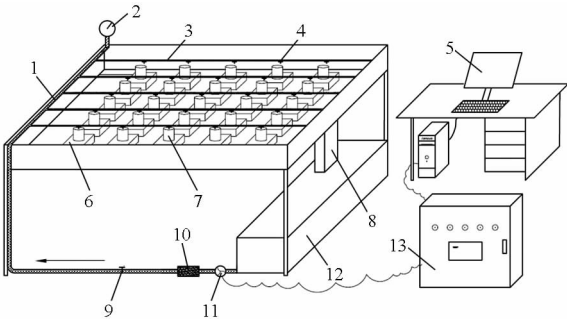


图 2 水力性能测试系统

Fig. 2 Hydraulic performance test system

1. 支管 2. 压力表 3. 毛管 4. 灌水器 5. 计算机 6. 质量传感器 7. 烧杯 8. 回水槽 9. 阀门 10. 过滤器 11. 水泵 12. 水箱 13. 变频稳压器

为了便于后续讨论,将由纯粘土、低速球磨混合粉体和高速球磨混合粉体 3 种原料烧制而成的微孔陶瓷分别标记为 A、B 和 C, 相应的灌水器也采用该标记进行区分。

2 结果与分析

2.1 微孔陶瓷的基本物理性能

表 1 给出了 3 种粘土基微孔陶瓷的平均孔径、开口孔隙率和抗弯强度。编号为 A、B、C 的 3 种微孔陶瓷的平均孔径分别为 4.2、4.6、4.4 μm, 3 种微

孔陶瓷的平均孔径相差很小, 满足本研究对微孔陶瓷孔径的一致性要求。

表 1 粘土基微孔陶瓷的基本物理性能			
Tab. 1 Physical properties of porous clay ceramics			
微孔陶瓷编号	平均孔径/μm	开口孔隙率/%	抗弯强度/MPa
A	4.2 ± 0.2	44	11
B	4.6 ± 0.2	51	19
C	4.4 ± 0.3	37	23

图 3a ~ 3c 给出了 3 种微孔陶瓷的微结构照片。可以看出, 随着原料中炉渣含量的增加以及球磨速度的增大, 微孔陶瓷内部颗粒的粒径有所减小, 但孔径相差不大, 且孔的连通性一直保持较好。图 3d 给出了炉渣颗粒的微结构照片。炉渣内部具有良好的空间多孔结构, 因此在原料中添加炉渣后, 可使微孔陶瓷的开口孔隙率增大。微孔陶瓷 A 的开口孔隙率为 44%, 添加炉渣后微孔陶瓷 B 的开口孔隙率为 51%, 比微孔陶瓷 A 增大 7 个百分点。由于炉渣中含有大量的非晶态 SiO₂, 在高温烧结时非晶态 SiO₂ 为粘稠液态, 能够将坯体中的颗粒拉近, 并与粘土中的 Al₂O₃ 和 CaO 反应生成钙铝石, 从而提高微孔陶瓷的力学性能。微孔陶瓷 A 的抗弯强度仅为 11 MPa, 微孔陶瓷 B 的开口孔隙率虽大于微孔陶瓷 A, 但其抗弯强度却比微孔陶瓷 A 高 8 MPa。将添加了炉渣的原料经高速球磨后, 原料的粒径将显著变小, 此时的坯体在高温烧结时, 其收缩率会显著增大^[24], 从而导致微孔陶瓷的开口孔隙率降低, 抗弯强度增大。如表 1 所示, 虽然微孔陶瓷 C 与微孔陶瓷 B 的原料成分相同, 但采用高速球磨工艺的微孔陶瓷 C 开口孔隙率仅为 37%, 抗弯强度却比微孔陶瓷 B 高 4 MPa。

2.2 微孔陶瓷渗流特性的影响因素

将微孔陶瓷灌水器安装于水力性能测试系统上, 通过改变系统水头、灌水器中微孔陶瓷片厚度和开口孔隙率, 测量不同灌水器的流量, 得出灌水器的流量与工作水头、微孔陶瓷片厚度和开口孔隙率的关系。灌水器中微孔陶瓷片上下表面的四周采用橡胶圈密封, 微孔陶瓷片的实际渗流面积为 4.9 cm²。图 4 为微孔陶瓷片单位面积流量与系统水头的对应关系。可以看出, 系统水头、微孔陶瓷厚度和开口孔隙率对灌水器的流量均有显著影响。当灌水器中微孔陶瓷片的厚度确定之后, 微孔陶瓷中微孔道的长度也随之确定, 微孔道对水流的阻力也确定。因此, 当微孔陶瓷片厚度不变时, 微孔陶瓷片单位面积流量随着系统水头的增加线性增大。如图 4a 所示, 以厚度为 4 mm 的微孔陶瓷片为例, 当系统水头从 1 m

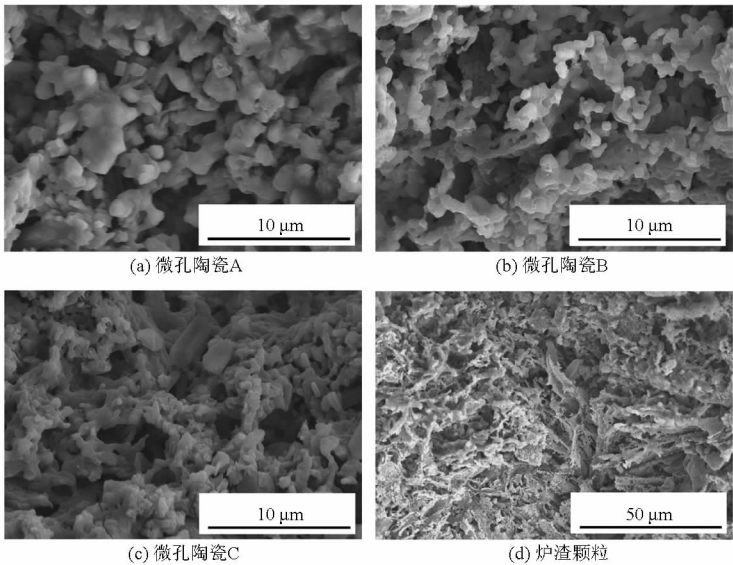


图 3 微孔陶瓷和炉渣的微结构照片

Fig. 3 SEM micrographs of porous ceramics and slag grains

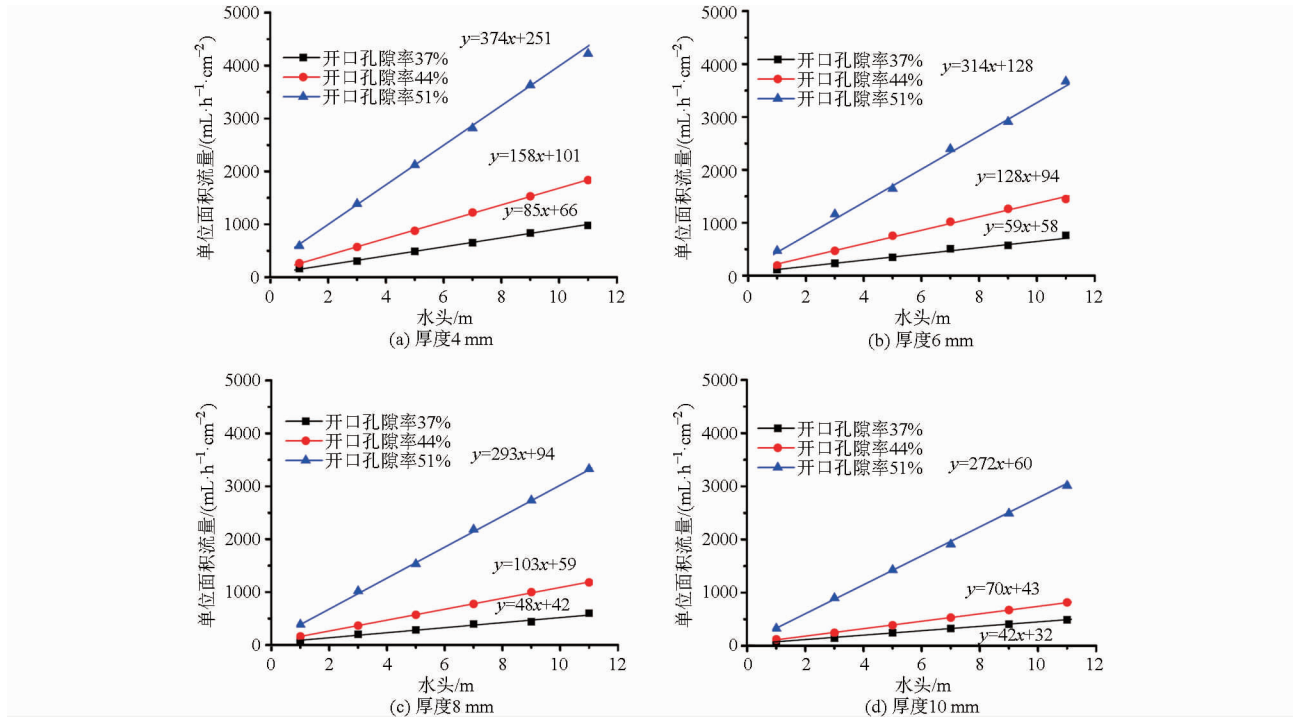


图 4 微孔陶瓷片单位面积流量与系统水头的关系

Fig. 4 Relationship of water flow rate per unit area and water head of porous ceramic disk

增至 11 m 时,微孔陶瓷 A 单位面积流量由 270 mL/(h·cm²)线性增至 1 840 mL/(h·cm²),微孔陶瓷 B 单位面积流量由 590 mL/(h·cm²)线性增至 4 230 mL/(h·cm²),微孔陶瓷 C 单位面积流量由 160 mL/(h·cm²)线性增至 980 mL/(h·cm²)。

随着灌水器中微孔陶瓷片厚度的增加,微孔陶瓷片内部微孔道对水的消能作用随之增加。为了便于对比微孔陶瓷片厚度的变化对其渗水性能的影响,图 5 给出了微孔陶瓷片单位面积流量与其厚度的对应关系。在本研究范围内,随着微孔陶瓷片厚度的增加,其单位面积流量基本呈线性下降。以开

口孔隙率为 51% 的微孔陶瓷 B 为例,随着微孔陶瓷片厚度由 4 mm 增至 10 mm,3 m 水头时微孔陶瓷片单位面积流量由 1 390 mL/(h·cm²)线性降至 900 mL/(h·cm²),7 m 水头时微孔陶瓷片单位面积流量由 2 820 mL/(h·cm²)线性降至 1 910 mL/(h·cm²),11 m 水头时微孔陶瓷片单位面积流量由 4 230 mL/(h·cm²)线性降至 3 010 mL/(h·cm²)。另外,通过对比图 5 中拟合的直线可知,随着微孔陶瓷片开口孔隙率和系统水头的增大,灌水器的流量下降速率变快。

通过对图 4 和图 5 的分析可以看出,微孔陶瓷

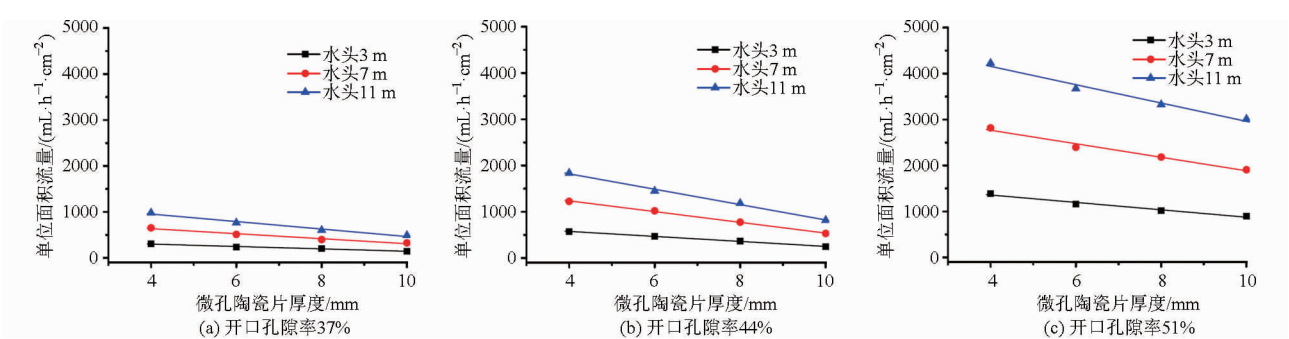


图5 微孔陶瓷灌水器单位面积流量与微孔陶瓷片厚度的关系

Fig.5 Relationship of water flow rate per unit area and specimen thickness of porous ceramic disk

片的厚度减小以及系统水头的增加,会使灌水器的流量线性增大。图4中给出了微孔陶瓷片单位面积流量与系统水头的函数关系式,所有的关系式均为线性函数。一般来说,在微孔道中流动的水处于层流状态。根据达西定律,微孔陶瓷的渗透系数 k 计算式为

$$k = \frac{v}{i} = \frac{q}{A} \frac{L}{H} = \frac{q}{AH} L \approx KL \tag{1}$$

- 式中
- v ——渗流速度,cm/h

i ——水力梯度

q ——灌水器的流量,mL/h

A ——灌水器的渗流面积,cm²

H ——微孔陶瓷片上、下表面的水压差,cm

L ——微孔陶瓷片的厚度,cm

K ——图4中拟合直线的斜率

通过式(1)得出厚度分别为4、6、8、10 mm的3种开口孔隙率的微孔陶瓷片的渗透系数 k_4 、 k_6 、 k_8 、 k_{10} ,如表2所示。微孔陶瓷的开口孔隙率、孔径和均匀性是影响其渗透系数的主要因素。对比表2的结果可以看出,微孔陶瓷的开口孔隙率对其渗透系数影响很大,随着开口孔隙率的增加,其渗透系数迅速增大。理论上,一种微孔陶瓷的渗透系数与其厚度无关。然而,微孔陶瓷的均匀性属于统计学上的均匀性,其内部会随机分布一定数量的缺陷,这些缺陷主要是一些尺寸较大的孔。本文中,随着微孔陶瓷片厚度的增加,这些大孔在数量上的积累必然会提高微孔陶瓷的渗水能力,从而增大其渗透系数的计算值。因此,如表2所示,对于相同开口孔隙率的微孔陶瓷片,其渗透系数会随微孔陶瓷片厚度的增加而缓慢增大,且微孔陶瓷片的厚度越大,开口孔隙率越高,渗透系数的增幅越大。为了尽量消除厚度对微孔陶瓷渗透系数的影响,将不同厚度微孔陶瓷片的渗透系数取平均值,作为该微孔陶瓷的渗透系数(k_a)。

图6给出了根据式(1)计算的3种微孔陶瓷的渗透系数 k_a 与开口孔隙率的对应关系。可以看出,

表2 粘土基微孔陶瓷的渗透系数

Tab.2 Hydraulic conductivity of porous clay ceramics

cm/h

渗透系数	开口孔隙率/%		
	37	44	51
k_4	0.372	0.730	1.614
k_6	0.381	0.844	1.940
k_8	0.391	0.889	2.431
k_{10}	0.544	1.077	2.567
k_a	0.422	0.845	2.158

当开口孔隙率从零增至51%时,渗透系数 k_a 从零迅速增至2.16 cm/h。通过拟合,得出渗透系数 k_a 与开口孔隙率 φ 满足

$$k_a = 73.6\varphi^{5.29} \tag{2}$$

由图4可知, $\frac{q}{AH}$ 近似等于拟合后的线性函数的斜率 K 。将线性函数的斜率 K 代入式(1)中,计算出微孔陶瓷渗透系数 k_b 。图6也给出了根据 K 计算的3种微孔陶瓷的渗透系数 k_b 与开口孔隙率的对应关系。当开口孔隙率从零增至51%时,渗透系数 k_b 从零迅速增至1.98 cm/h,通过拟合,得出渗透系数 k_b 与开口孔隙率 φ 的幂函数关系式为

$$k_b = 65.9\varphi^{5.27} \tag{3}$$

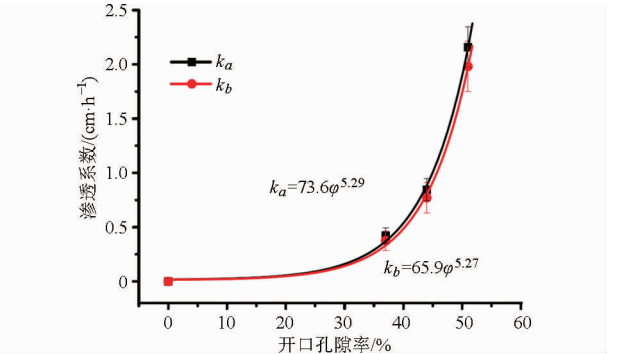


图6 微孔陶瓷的渗透系数与开口孔隙率的关系

Fig.6 Relationship of hydraulic conductivity and open porosity of porous clay ceramic

图6的2条幂函数曲线具有很高的相似度,式(2)、(3)的幂函数表达式也很相似。当已知微孔

陶瓷的开口孔隙率时,通过式(2)或式(3)即可快速计算出微孔陶瓷的渗透系数。

将式(1)、(2)联立,可以得出微孔陶瓷灌水器流量的函数表达式

$$q = \frac{73.6\varphi^{5.29}AH}{L} \quad (4)$$

由式(4)可知,微孔陶瓷灌水器的流量与微孔陶瓷片的渗流面积以及系统的水头呈正比,与微孔陶瓷片的厚度呈反比,与微孔陶瓷片的开口孔隙率呈幂函数关系。

3 结论

(1)通过改变原料的配比、制备工艺以及坯体的烧结温度和时间,得到3种孔径相同但开口孔隙

率不同的粘土基微孔陶瓷。3种粘土基微孔陶瓷具有较高的抗弯强度,合适的孔径和开口孔隙率,微结构均匀,孔连通性好。

(2)将微孔陶瓷加工成圆片状,组装成灌水器,研究了微孔陶瓷片的厚度和开口孔隙率对其渗透系数以及灌水器流量的影响规律。灌水器的流量与微孔陶瓷片的渗流面积以及灌溉系统的水头呈正比,与微孔陶瓷片的厚度呈反比,与微孔陶瓷片的开口孔隙率呈幂函数关系。

(3)在微孔陶瓷灌水器的制备和实际使用过程中,可以根据微孔陶瓷灌水器流量函数式,通过改变微孔陶瓷片的渗流面积、厚度、开口孔隙率以及灌溉系统的水头来调节灌水器的流量,以满足作物的灌溉需求。

参 考 文 献

- 1 石声汉. 氾胜之书今释[M]. 北京:科学出版社, 1956.
- 2 魏正英, 苑伟静, 周兴, 等. 我国压力补偿灌水器的研究进展[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 94-101, 107.
WEI Zhengying, YUAN Weijing, ZHOU Xing, et al. Research progress of pressure compensating emitters in micro-irrigation systems in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 94-101, 107. (in Chinese)
- 3 李云开, 刘世荣, 杨培岭, 等. 滴头锯齿型迷宫流道消能特性的流体动力学分析[J]. 农业机械学报, 2007, 38(12): 49-52.
LI Yunkai, LIU Shirong, YANG Peiling, et al. Hydrokinetics analysis on the pressure losses in sawtooth-labyrinth path drip irrigation emitters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(12): 49-52. (in Chinese)
- 4 喻黎明, 吴普特, 牛文全. 迷宫流道偏差量对灌水器水力性能及抗堵塞性能的影响[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 64-68.
YU Liming, WU Pute, NIU Wenquan. Influence of the offset of labyrinth channels of drip emitters on hydraulic and anti-clogging performance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 64-68. (in Chinese)
- 5 陈艳, 白丹, 任长江, 等. 基于分形理论的地下滴灌灌水器水力特性研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(增刊): 47-52.
CHEN Yan, BAI Dan, REN Changjiang, et al. Research on the hydraulic properties of SDI emitter based on fractal theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.): 47-52. (in Chinese)
- 6 王洪源, 李光永. 滴灌模式和灌水下限对甜瓜耗水量和产量的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(5): 47-51.
WANG Hongyuan, LI Guangyong. Effect of drip irrigation model and irrigation start point on water consumption and yield of sweet melon[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(5): 47-51. (in Chinese)
- 7 SIMONIS J J, BASSON A K. Evaluation of a low-cost ceramic micro-porous filter for elimination of common disease microorganisms[J]. Physics and Chemistry of the Earth Part A, 2011, 36(14): 1129-1134.
- 8 SALAMON D, LAMMERTINK R G, WESSLING M. Surface texturing inside ceramic macro/micro channels[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2010, 30(6): 1345-1350.
- 9 MONDAL R C. Farming with a pitcher; a technique of water conservation[J]. World Crops, 1974, 262: 91-97.
- 10 SIYAL A A, SKAGGS T H. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(6): 893-904.
- 11 SIYAL A A, VAN GENUCHTEN M T, SKAGGS T H. Solute transport in a loamy soil under subsurface porous clay pipe irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2013, 121: 73-80.
- 12 ABU-ZREIG M M, ABE Y, ISODA H. The auto-regulative capability of pitcher irrigation system[J]. Agricultural Water Management, 2006, 85(3): 272-278.
- 13 ABU-ZREIG M M, ATOUM F M. Hydraulic characteristics of clay pitchers produced in Jordan[J]. Canadian Biosystems Engineering, 2004, 46(1): 15-20.
- 14 STEIN T M. The influence of evaporation, hydraulic conductivity, all thickness and surface area on the seepage rates of pitchers for pitcher irrigation[J]. Zeitschrift für Bewässerungswirtschaft, 1997, 32(1): 65-84.
- 15 XU P, YU B. Developing a new form of permeability and Kozeny-Carman constant for homogeneous porous media by means of fractal geometry[J]. Advances in Water Resources, 2008, 31(1): 74-81.
- 16 FALLICO C, DE BARTOLO S, TROISI S, et al. Scaling analysis of hydraulic conductivity and porosity on a sandy medium of an unconfined aquifer reproduced in the laboratory[J]. Geoderma, 2010, 160(1): 3-12.

YANG Yunfei, ZHENG Huiying, LI Jiandong. Comparitive study on characters of two divergence types of the clone population leymus chinensis in the Songnen Plain of China [J]. Acta Botanica Sinica, 1997, 39(11): 1058 – 1064. (in Chinese)

18 何为,薛卫东,唐斌. 优化试验设计方法及数据分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.

19 姚军,吴发启,宋娟丽,等. 黄土高原沟壑区坡耕地表层土壤抗剪强度影响因素分析[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(3): 236 – 239.

YAO Jun, WU Faqi, SONG Juanli, et al. Analysis of influence factors on the shearing strength of the topsoil of sloped farmland of gully regions in the Loess Plateau area [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(3): 236 – 239. (in Chinese)

20 陈红星,李法虎,郝仕玲,等. 土壤含水率与土壤碱度对土壤抗剪强度的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 22 – 25.

CHEN Hongxing, LI Fahu, HAO Shiling, et al. Effects of soil water content and soil sodicity on soil shearing strength [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2): 22 – 25. (in Chinese)

21 郑子成,张锡洲,李廷轩,等. 玉米生长期土壤抗剪强度变化特征及其影响因素[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 125 – 130, 172.

ZHENG Zicheng, ZHANG Xizhou, LI Tingxuan, et al. Change characteristics and influencing factors of soil shear strength during maize growing period[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 125 – 130, 172. (in Chinese)

22 YILMAZ Y. Compaction and strength characteristics of fly ash and fiber amended clayey soil [J]. Engineering Geology, 2015, 188: 168 – 177.

23 KUMAR A, WALIA B S, MOHAN J. Compressive strength of fiber reinforced highly compressible clay [J]. Construction and Building Materials, 2006, 20(10): 1063 – 1068.

24 MAZARI M, NAVARRO E, ABDALLAH I, et al. Comparison of numerical and experimental responses of pavement systems using various resilient modulus models [J]. Soils and Foundations, 2014, 54(1): 36 – 44.

25 李小昱,雷廷武,王为. 土壤抗压强度的试验研究[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 19 – 21.

LI Xiaoyu, LEI Tingwu, WANG Wei. Experimental research on unconfined compression strength of soil [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5): 19 – 21. (in Chinese)

26 FATTETA M, FUB Y, GHESTEMC M, et al. Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: relationship between aggregate stability and shear strength [J]. CATENA, 2011, 87(1): 60 – 69.

27 赵树德. 土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.

28 毛雪松,侯仲杰,王威. 基于含水量和冻融循环的重塑土回弹模量试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 2): 3585 – 3590.

MAO Xuesong, HOU Zhongjie, WANG Wei. Experimental research on resilient modulus of remolded soil based on water content and freeze-thaw cycles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Supp. 2): 3585 – 3590. (in Chinese)

29 SIANG A J L M, WIJEYESEKERA D C, MEI L S, et al. Innovative laboratory assessment of the resilient behaviour of materials (rigid, elastic and particulates) [J]. Procedia Engineering, 2013, 53: 156 – 166.

30 曾德超. 机械土壤动力学[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1995.

(上接第 78 页)

17 COMEGNA V, DAMIANI P, SOMMELLA A. Scaling the saturated hydraulic conductivity of a vertic ustorthens soil under conventional and minimum tillage[J]. Soil & Tillage Research, 2000, 54(1): 1 – 9.

18 FLINT L E, SELKER J S. Use of porosity to estimate hydraulic properties of volcanic tuffs[J]. Advances in Water Resources, 2003, 26(5): 561 – 571.

19 MORIN R H. Negative correlation between porosity and hydraulic conductivity in sand-and-gravel aquifers at Cape Cod, Massachusetts, USA[J]. Journal of Hydrology, 2006, 316(1): 43 – 52.

20 NIWAS S, CELIK M. Equation estimation of porosity and hydraulic conductivity of Ruhrtal aquifer in Germany using near surface geophysics[J]. Journal of Applied Geophysics, 2012, 84: 77 – 85.

21 LI X, WU P, ZHU D. Effect of foaming pressure on the properties of porous Si₃N₄ ceramic fabricated by a technique combining foaming and pressureless sintering[J]. Scripta Materialia, 2013, 68(11): 877 – 880.

22 LI X, ZHANG L, YIN X. Microstructure and mechanical properties of three porous Si₃N₄ ceramics fabricated by different techniques[J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 549: 43 – 49.

23 LI X, WU P, ZHU D. Properties of porous alumina ceramics prepared by technique combining cold-drying and sintering[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2013, 41: 437 – 441.

24 蔡耀辉,吴普特,朱德兰,等. 粘土基微孔陶瓷渗灌水器制备与性能优化[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 183 – 188.

CAI Yaohui, WU Pute, ZHU Delan, et al. Preparation and performance optimization of clay-based porous ceramics used in subsurface irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 183 – 188. (in Chinese)