

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.024

微孔混凝土灌水器制备工艺与性能研究

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: 提出了一种渗灌用微孔混凝土灌水器制备工艺,详细研究了原料中砂子粒径和水泥含量对微孔混凝土灌水器的抗折强度、开口孔隙率、平均孔径和水力性能的影响规律,优选出了微孔混凝土灌水器的最佳制备工艺。研究表明,砂子的粒径变化对灌水器的抗折强度、开口孔隙率、平均孔径和流量的影响不大;随着原料中水泥含量的增加,灌水器的抗折强度逐渐增大、开口孔隙率显著降低、平均孔径变小,继而导致灌水器的流量显著减小,其中水泥质量分数为15%~18%的微孔混凝土灌水器具有适中的抗折强度、开口孔隙率和平均孔径,可兼顾灌水器的可靠性和流量要求,而且流量稳定,是一种性能优异的渗灌灌水器。

关键词: 灌水器; 微孔; 混凝土; 渗灌; 流量

中图分类号: S275 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)07-0176-07

Preparation and Performance Study on Microporous Concrete Irrigation Emitters

Li Xiangming Yang Jianguo

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

Abstract: Microporous concrete irrigation emitters were prepared with dry pressing method and then cured by an atomizing humidifying means. The effect of particle size of sand and cement content in raw material on the flexural strength, open porosity, pore size and hydraulic performance of the irrigation emitters was studied. By testing the hydraulic performance of the irrigation emitters, the variation of the water flow rate of irrigation emitters with time was analyzed, and the reason causing the variation was investigated. The particle size of sand has little effect on the flexural strength, open porosity and mean pore size of microporous concrete. As cement increases, the microporous concrete increases gradually in flexural strength, decreases obviously in open porosity and gradually in mean pore size. The water flow rate of irrigation emitters decreases obviously with the increase of cement in raw material, and decreases slightly as the particle size of sand decreases. When the cement content of raw material was 12%, the irrigation emitters are of high water flow rate but easy to be destroyed because of low strength. When the cement content of raw material was 21%, the irrigation emitters have good reliability due to their high strengths but are hardly to be used in practice because of very low water flow rate. When the cement content of raw material was 15%~18%, the irrigation emitters possess both good reliability and relative high water flow rate due to their suitable strengths, open porosities and mean pore sizes. During hydraulic performance testing, the soluble alkali in microporous concrete was dissolved and taken out by water, which makes the water flow rate with time of the irrigation emitters increase slightly because of the gradual increase of open porosity and mean pore size. Nevertheless, the slight increase of water flow rate has little impact on irrigation in practice. The microporous concrete irrigation emitters are promising good subirrigation emitters.

Key words: irrigation emitters; microporous; concrete; subirrigation; flow rate

收稿日期: 2016-01-15 修回日期: 2016-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479172, 51209177)和陕西省水利科技项目(2015slkj-10, 2011slkj-05)

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及灌溉工程技术研究, 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。据《汜胜之书》记载,早在两千多年前,中国就有将陶制品用于渗灌的记载^[1]。将陶罐、瓦管和陶土头等陶制品埋入地下^[2-6],灌溉水通过陶制品中相互连通的微孔向外缓慢渗出,直接入渗到作物根系附近的土壤中供作物吸收^[7-13]。这种灌溉方式不仅节水、节能效果显著,而且经久耐用、造价低廉,至今在伊朗、印度、约旦等干旱和半干旱地区仍被广泛使用^[6,14-15]。

近几年,随着微孔陶瓷在渗灌中的应用逐渐被认可,一些学者对影响微孔陶瓷渗灌的因素进行了研究^[5,6,16-21]。笔者曾以粘土为主要原料,以硅藻土、炉渣和硅溶胶为性能改良剂,采用烧结法制备了力学性能稳定、孔隙率高的粘土基微孔陶瓷灌水器^[22-23],研究了灌溉水头以及微孔陶瓷的孔隙率、厚度和渗流面积对灌水器流量的影响规律,拟合了灌水器流量与灌溉水头以及微孔陶瓷的开口孔隙率、厚度和渗流面积的函数关系,进一步验证了微孔陶瓷灌水器用于渗灌的可行性^[24]。虽然微孔陶瓷用于渗灌已被证实可行,但微孔陶瓷灌水器的制备需要采用烧结工艺,会增加灌水器的生产成本,不利于农业推广。

混凝土是以水泥为胶凝材料,以砂子和石子为骨料,经加水搅拌、浇筑成型、凝结固化成具有一定强度的“人工石材”,被广泛用于建筑行业的承载构件。广义上,混凝土和陶瓷同属于无机非金属材料,具有很多相同的物理和化学特性。通过前期探索发现,采用合适的制备工艺和原料配比,可制备出具有多微孔结构的混凝土材料。这种微孔混凝土与微孔陶瓷一样具有很好的渗水性能,同样可以用作渗灌灌水器。更重要的是,微孔混凝土灌水器无需进行烧结,可大幅降低灌水器的制造成本,有利于农业推广。

本文在前期探索的基础上,以砂子和水泥为主要原料,以硅溶胶为模压粘接剂,先采用干压法制备出微孔混凝土灌水器,然后通过雾化加湿对微孔混凝土灌水器进行养护。系统研究砂子粒径和水泥含量变化对微孔混凝土灌水器抗折强度、开口孔隙率、平均孔径和水力性能的影响规律;详细研究微孔混凝土灌水器流量随时间的变化规律;以灌水器的质量保持情况为依据,分析讨论导致灌水器流量变化的原因。

1 材料制备与实验方法

1.1 材料制备过程

实验使用的原料有水泥、砂子和硅溶胶。水泥(P. O52.5)由浙江三狮集团特种水泥有限公司提供,标准砂由厦门艾思欧标准砂有限公司提供,硅溶胶(SiO_2 质量分数为25%,平均粒径为10~20 nm; Na_2O 质量分数小于等于0.1%)由山东百特新材料有限公司提供。

将硅溶胶倒入烧杯中,一边搅拌一边缓慢添加去离子水,最后得到 SiO_2 质量分数为10%的稀释硅溶胶。将标准砂依次过12目、18目、30目和80目的筛子,选出粒径范围分别为1.0~1.7 mm、0.6~1.0 mm和0.18~0.6 mm的3种砂子。将水泥分别与3种砂子按比例混合装入球磨罐中,采用滚筒式球磨机混合1 h后制成混合粉料,其中混合粉料中的水泥质量分数分别为12%、15%、18%和21%。将混合粉料倒入水泥胶砂搅拌机(JJ-5型,华锡,中国无锡)中,一边搅拌(自转速度140 r/min,公转速度70 r/min)一边喷洒稀释后的硅溶胶。硅溶胶的喷洒量根据混合粉料中水泥的总量计算,每100 g水泥喷洒30 g稀释硅溶胶。硅溶胶喷洒完毕后,混合粉料继续搅拌20 min,然后倒入模具中,采用10 MPa的压力模压成混凝土灌水器 and 抗折强度的测试试件。

上述制备过程中用到的硅溶胶是一种纳米二氧化硅颗粒在水中的分散液。当硅溶胶中的水分蒸发后,胶体粒子会牢固地附着在物体表面,而胶体中粒子间形成的硅氧结合是一种很好的无机粘合剂。在前期探索实验中发现:在对混合粉料进行模压时,原料中不能加入太多的水,否则制备出的微孔混凝土灌水器中几乎全部是闭气孔,不具有渗水性能,无法用作灌水器;而原料中加入水量太少,模压后的微孔混凝土灌水器由于强度太低,无法脱模。本文将含有少量硅溶胶的水喷洒到混合粉料中,既能保证微孔混凝土灌水器在模压时具有足够的脱模强度,又能保证制备出的微孔混凝土灌水器具有较高的开口孔隙率。

将混凝土灌水器 and 测试试件置于图1a所示的有机玻璃箱中,每天利用超声波雾化器对其进行加湿养护6 h。养护28 d后,将微孔混凝土灌水器取出进行干燥,然后与塑料顶盖进行粘接组装,如图1b所示。在进行灌水器水力性能测试时,水流由塑料顶盖的进水口进入灌水器,然后经由灌水器四壁的微孔缓慢渗出。

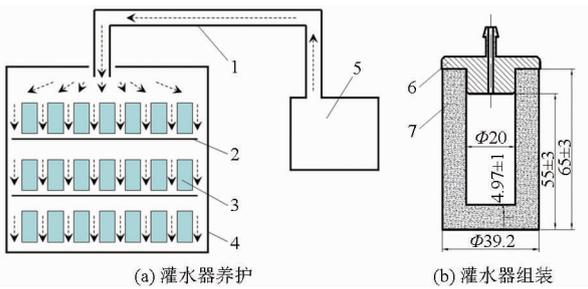


图1 微孔混凝土灌水器的养护和组装示意图

Fig.1 Curing and assembling schematic diagram of microporous concrete irrigation emitters

1. 雾化蒸汽输送管 2. 搁架 3. 混凝土灌水器 4. 有机玻璃箱
5. 超声波雾化器 6. 塑料瓶盖 7. 灌水器主体

1.2 测试指标与方法

微孔混凝土灌水器的基本性能测试包括抗折强度、开口孔隙率和平均孔径。抗折强度利用抗折试验机(DKZ-500型,昊锐,中国沧州)进行测试,试件尺寸为 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 550\text{ mm}$,测试结果为5个试件的平均值。开口孔隙率采用阿基米德排水法测试,测试结果为5个样品的平均值。平均孔径利用压汞仪(Poremaster 60型,康塔,美国)进行测试,测试结果为4个样品的平均值。

将微孔混凝土灌水器安装于水力性能测试系统上,测试其不同水头下的流量。测试时采用称量法,测试时间为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,每个类型的灌水器数量不少于5个。测试完毕后,将系统水头保持在1 m连续工作,在工作时间分别达到1、2、4、8、16、32 d时,测试每个灌水器的流量,并将每个灌水器取下将其腔内的水分完全排空进行称量,实时记录每个灌水器的质量变化,然后将灌水器重新安装于水力性能测试系统上继续工作,直至下一测试时间点重复上述步骤。

为了便于后续讨论,将不同水泥含量和砂子粒径的微孔混凝土灌水器及试件标记为C-m-n。其中m代表水泥的质量分数(12%、15%、18%和21%),由具体的数字(12、15、18和21)表示;n为砂子的粒径,分别由粗(coarse, 1.0~1.7 mm)、中(middle, 0.6~1.0 mm)、细(fine, 0.18~0.6 mm)的英文首字母表示。

2 结果分析

2.1 微孔混凝土试件的抗折强度、开口孔隙率和平均孔径

表1对比了不同混凝土试件的抗折强度、开口

孔隙率和平均孔径。对于同一水泥含量的混凝土试件,随着砂子粒径的减小,试件的抗折强度基本保持不变,开口孔隙率略微降低,平均孔径逐渐减小;而且随着水泥含量的增加,开口孔隙率的变化幅度略有增大,平均孔径的变化幅度反而减小。对于同一砂子粒径的混凝土试件,随着水泥含量的增加,试件的抗折强度逐渐增大,平均孔径逐渐减小,由于水泥的增加会堵塞试件内部砂粒之间的微孔道,因此试件的开口孔隙率显著降低。以C-12混凝土试件为例,随着砂子粒径由粗变细,试件的抗折强度保持在2.6~2.7 MPa,开口孔隙率仅降低了1.1%,平均孔径由 $3.1\text{ }\mu\text{m}$ 减至 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 。再以C-21混凝土试件为例,随着砂子粒径由粗变细,试件的抗折强度保持在3.4~3.5 MPa,开口孔隙率由13.5%降至10.2%,减少了3.3个百分点,平均孔径仅减小了 $0.3\text{ }\mu\text{m}$ 。与C-12相比,C-21的抗折强度增大了0.8 MPa,平均孔径减小了 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ ~ $0.8\text{ }\mu\text{m}$,但开口孔隙率却由34.2%~35.3%显著降至10.2%~13.5%。

表1 微孔混凝土试件的抗折强度、开口孔隙率和平均孔径

Tab.1 Flexural strength, open porosity and mean pore size of microporous concrete test specimen

水泥含量 编号	砂子粒径 编号	抗折强度/ MPa	开口孔隙 率/%	平均孔径/ μm
C-12	c	2.6	35.3	3.1
	m	2.7	34.7	2.7
	f	2.6	34.2	2.5
C-15	c	2.8	26.8	2.9
	m	2.8	25.9	2.6
	f	2.9	25.4	2.4
C-18	c	3.2	20.2	2.6
	m	3.1	18.5	2.4
	f	3.2	17.7	2.2
C-21	c	3.4	13.5	2.3
	m	3.5	11.4	2.1
	f	3.5	10.2	2.0

2.2 微孔混凝土灌水器的水力性能

表2给出了在不同测试水头下各种微孔混凝土灌水器的流量。在进行水力性能测试时,对于正常工作的灌水器,系统中的水经由灌水器内部的微孔道缓慢渗出,然后在灌水器外表面汇流而下,如图2a所示。对于C-12灌水器,由于其开口孔隙率较高、平均孔径较大,当系统水头只有1 m时,其流量仍高达 $3.06\text{ }\sim\text{ }3.78\text{ L/h}$ 。由于水泥含量较少,C-12灌水器中砂粒之间的粘接强度较低,当系统水头较低时,C-12灌水器内部的微孔道能够维持原结构,

表 2 微孔混凝土灌水器的流量
Tab.2 Flow rate of microporous concrete irrigation emitters

L/h

水泥含量 编号	砂子粒径 编号	系统水头/m										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
C-12	c	3.78										
	m	3.36	5.71									
	f	3.06	5.34									
C-15	c	1.74	2.88	4.14	5.52							
	m	1.56	2.58	3.54	4.68	5.82						
	f	1.44	2.4	3.36	4.38	5.28	6.24					
C-18	c	0.96	1.51	2.12	2.64	3.18	3.78	4.31	4.85	5.37	5.93	
	m	0.84	1.32	1.78	2.31	2.89	3.4	3.92	4.46	5.02	5.57	
	f	0.78	1.2	1.62	2.16	2.64	3.12	3.59	4.09	4.61	5.14	5.71
C-21	c	0.06	0.18	0.29	0.42	0.58	0.72	0.87	1.03	1.19	1.36	1.53
	m		0.07	0.19	0.32	0.43	0.55	0.67	0.8	0.94	1.07	1.21
	f		0.05	0.12	0.23	0.35	0.46	0.57	0.69	0.81	0.93	1.07

对灌水器的出流尚不构成影响,而当系统水头较高时,C-12 灌水器内部微孔道四壁的砂粒难以承受水流的冲蚀,使得微孔道被逐渐冲垮发生坍塌,继而导致 C-12 灌水器表面出现如图 2b 所示的喷射状出流现象。随着系统水头继续增大,C-12 灌水器出现如图 2c 所示更严重的喷射现象。

随着水泥含量的增加,C-15 灌水器的开口孔隙率降至 25.4% ~ 26.8%,平均孔径减至 2.4 ~ 2.9 μm ,当系统水头为 1 m 时,C-15 灌水器的流量为 1.44 ~ 1.74 L/h。与 C-12 灌水器相比,由于 C-15 灌水器内部砂粒之间的粘接强度相对较高,在系统水头小于 5 m 时,灌水器工作状态保持良好。随着系统水头由 1 m 增至 4 m,C-15 灌水器的流量由 1.44 ~ 1.74 L/h 逐渐增至 4.38 ~ 5.52 L/h。当系统水头高于 5 m 时,C-15 灌水器同样出现了类似图 2b 所示的喷射现象,随着系统水头继续增大,继而出现了类似图 2c 所示更严重的喷射现象。随着水泥含量进一步增加,C-18 灌水器的开口孔隙率降至 17.7% ~ 20.2%,平均孔径降至 2.2 ~ 2.6 μm ,当系统水头为 1 m 时,C-18 灌水器的流量仅为 0.78 ~ 0.96 L/h。随着系统水头由 1 m 增至 10 m,C-18 灌水器的出流状态始终保持良好,流量平稳增至 5.14 ~ 5.93 L/h。当系统水头高于 11 m 时,C-18 灌水器开始出现喷射现象。由于 C-21 灌水器水泥含量较高,其开口孔隙率仅为 10.2% ~ 13.5%,平均孔径仅为 2.0 ~ 2.3 μm ,当系统水头为 1 m 时,C-21 灌水器的出流效果很差,有些仅是表面被润湿,难以出流,如图 2d 所示。当系统水头为 2 m 时,C-21 灌水器的流量才略微增至 0.05 ~ 0.18 L/h。随着系统水头增至 11 m,C-21 灌水器

的流量缓慢增至 1.07 ~ 1.53 L/h。

由表 2 的结果来看,不论系统水头为多少,随着水泥含量的增加,灌水器的流量显著减小;对于同一水泥含量的灌水器,随着砂子粒径的减小,由于灌水器的开口孔隙率略微降低、平均孔径逐渐减小,其流量也会有所减小。另外,根据灌水器的出流情况,将喷射状出流认定为灌水器失效。C-12 灌水器虽然在系统水头 1 m 时流量较大,但其可靠性较差,灌水器极易发生失效而影响整体灌溉效果,因此予以排除。C-21 灌水器的出流量太小,要达到预期的灌溉效果,必须采用较高的水头,增加了灌溉成本,同样予以排除。综上所述,微孔混凝土灌水器的最佳水泥质量分数范围应为 15% ~ 18%。

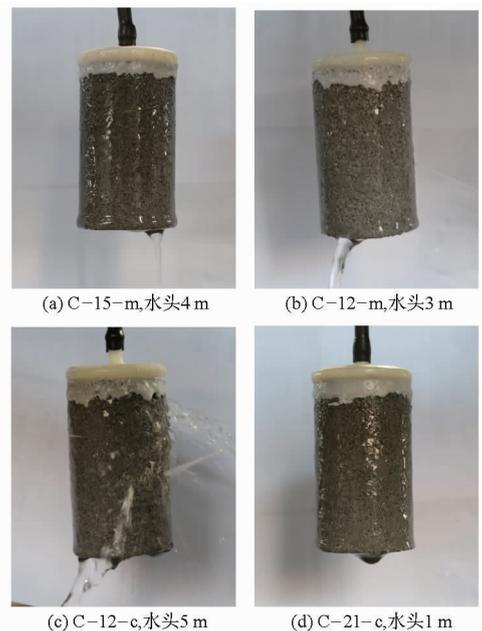


图 2 微孔混凝土灌水器的出流照片

Fig.2 Outflow pictures of microporous concrete irrigation emitters

2.3 微孔混凝土灌水器流量随时间变化情况

在水力性能测试完毕之后,将 C-12 和 C-21 灌水器全部取下,然后将系统水头保持在 1 m 持续工作 32 d。图 3 给出了 C-15 和 C-18 灌水器的流量随时间的变化规律。可以看出,随着测试时间的增加,C-15 和 C-18 灌水器的流量有所变化,且表现出不同的变化趋势,C-15 灌水器的流量一直在缓慢增大,C-18 灌水器的流量则先缓慢减小后逐渐增大。对于 C-15 灌水器,随着测试时间由 1 d 增至 32 d,C-15-c 的流量由 1.74 L/h 增至 1.92 L/h,C-15-m 的流量由 1.56 L/h 增至 1.79 L/h,C-15-f 的流量由 1.44 L/h 增至 1.71 L/h。对于 C-18 灌水器,随着测试时间由 1 d 增至 8 d,C-18-c 灌水器的流量由 0.96 L/h 减至 0.89 L/h,C-18-m 灌水器的流量由 0.84 L/h 减至 0.78 L/h,C-18-f 灌水器的流量由 0.78 L/h 减至 0.69 L/h。在 8 d 之后,C-18 灌水器的流量开始逐渐增大,随着测试时间由 8 d 增至 32 d,C-18-c 灌水器的流量由 0.89 L/h 增至 1.05 L/h,C-18-m 灌水器的流量由 0.78 L/h 增至 0.91 L/h,C-18-f 灌水器的流量由 0.69 L/h 增至 0.82 L/h。总体上,虽然 C-15 和 C-18 灌水器的流量随测试时间的增加有所变化,但变化幅度并不大,对实际灌溉效果基本不会造成影响。

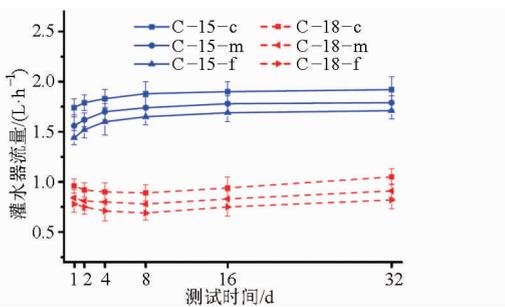


图3 微孔混凝土灌水器的流量随时间的变化规律

Fig. 3 Flow rate of microporous concrete irrigation emitters as a function of time

关于微孔陶瓷灌水器流量随时间变化的研究已有少量报道。在进行水力性能测试时,自来水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 CO_3^{2-} 离子会以碳酸盐和硫酸盐的形式沉淀在微孔陶瓷内部微孔中,造成微孔陶瓷的开口孔隙率降低、孔径变小。而开口孔隙率降低、孔径变小又直接导致微孔陶瓷的渗透系数降低,继而使得微孔陶瓷灌水器流量减小^[25]。因此采用自来水进行测试时,微孔陶瓷灌水器的流量会随时间逐渐降低,最终达到低位平衡。理论上,微孔陶瓷灌水器在工作时,其内部腔体被水完全浸满。在研究微孔陶瓷灌水器的水力性能时发现,若采用循环的动态水进行测试,动态水在进入灌水器后,由于水

流速度突然变慢,水中溶解的气体会逐渐析出并聚集在灌水器腔体中形成“气堵”,阻碍灌水器内壁与水接触,减小灌水器的渗水面积,同样会造成灌水器的流量减小。

根据已有研究^[24],系统的水头、微孔陶瓷的渗透系数以及灌水器的尺寸是影响微孔陶瓷灌水器流量的3个因素。若系统水头以及微孔混凝土灌水器的渗透系数和尺寸不变的情况下,灌水器的流量应保持恒定,但图3中C-15和C-18灌水器的流量却发生了变化,而且与已有研究报道不同,其流量不但没有减小反而有所增大。本文中,采用去离子水进行水力性能测试,不会有碳酸盐和硫酸盐沉淀在微孔混凝土灌水器内部孔隙中,而且即便是有沉淀发生,灌水器的流量也应该减小。采用尺寸较大的马氏瓶准确控制系统的水头,既能保证整个测试过程中系统水头的稳定,还能使去离子水中的少量气体尽量在马氏瓶中析出,不至于使灌水器发生“气堵”,而且即便发生了“气堵”,灌水器的流量也应该减小,而不是增大。

本文制备的微孔混凝土灌水器,实际上是以少量的水泥为粘接剂,将大量砂子粘接在一起,经固化形成的一种多微孔结构。与传统的致密混凝土相比,微孔混凝土灌水器内部具有较大的比表面积,水在其内部微孔道中流动时,会将水泥中的可溶性碱逐渐溶解并带出,从而使灌水器的质量逐渐降低。图4给出了C-15和C-18灌水器的质量保持率随时间的变化规律。如图4所示,在连续测试1d后,C-15灌水器的质量保持率为99.84%,C-18灌水器的质量保持率为99.80%,2种灌水器的质量保持率相差不大。随着测试时间的增加,由于2种灌水器的水泥含量不同,可溶性碱含量也不同,灌水器的质量下降速率开始出现差异。当测试时间增至8d时,C-15灌水器的质量保持率为99.10%,C-18灌水器的质量保持率为98.69%。随着灌水器中可溶性碱含量的持续减少,灌水器的质量下降速率开

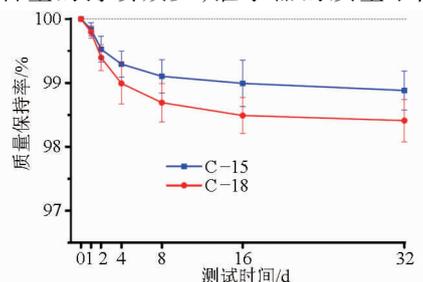


图4 C-15和C-18灌水器的质量保持率随时间的变化规律

Fig. 4 Quality retention of C-15 and C-18 as a function of time

始变缓。如图4所示,随着测试时间由8 d增至32 d,C-15灌水器的质量保持率仅由99.10%降至98.88%,C-18灌水器的质量保持率仅由98.69%降至98.41%。

综合分析图3和图4的结果,随着微孔混凝土灌水器内部的可溶性碱被水逐渐溶解带走,灌水器内部微孔道中的不规则棱角开始松动,并逐渐被水流冲蚀剥离,使得灌水器的开口孔隙率增高、平均孔径增大,从而导致灌水器的流量逐渐增大。相对于C-15灌水器,由于C-18灌水器中的水泥含量较高,其内部微孔道中的不规则棱角较多,再加上其开口孔隙率较低、平均孔径较小,被冲蚀剥离的不规则棱角会部分堵塞在灌水器内部微孔道中,因此在测试初期C-18灌水器的流量随时间的增加反而有所减小。随着测试时间的继续增加,C-18灌水器中更多的可溶性碱被溶解带走,其开口孔隙率进一步增高、平均孔径进一步增大,这时C-18灌水器的流量才开始逐渐增大。

3 结论

本文以砂子和水泥为主要原料,以硅溶胶为模压粘接剂,采用干压结合雾化加湿法成功制备出了性能优异的微孔混凝土灌水器。结果表明:

(1)砂子的粒径对微孔混凝土的抗折强度、开

口孔隙率和平均孔径影响均较小;随着水泥含量的增加,微孔混凝土的抗折强度逐渐增大、开口孔隙率显著降低、平均孔径逐渐减小。

(2)由砂子粒径和水泥含量变化导致的微孔混凝土开口孔隙率和平均孔径变化,是导致灌水器流量变化的主要原因。总体上,水泥含量对微孔混凝土灌水器流量的影响较大,随着水泥含量的增加,灌水器的流量显著减小,而对于同一水泥含量的微孔混凝土灌水器,随着砂子粒径的减小,灌水器的流量也会有所减小,但减小幅度不大。

(3)当水泥质量分数为12%时,灌水器的流量较大,但灌水器的强度不够、可靠性较差,在实际灌溉过程中极易发生破坏而失效。当水泥质量分数为21%时,灌水器的强度较高、可靠性较好,但灌水器的流量太小,必须采用较高的水头才能达到预期的灌溉效果。当水泥质量分数为15%~18%时,灌水器具有较高的强度、适中的开口孔隙率和平均孔径,在实际灌溉时可兼顾灌水器的可靠性和流量要求。

(4)在进行长时间水力性能测试时,微孔混凝土中的少量可溶性碱会被水溶解带走,使得灌水器的开口孔隙率增高、平均孔径增大,继而造成灌水器的流量增大。总体上,微孔混凝土灌水器的流量随时间变化很小,对实际灌溉效果不会造成影响,是一种性能优异且稳定的渗灌灌水器。

参 考 文 献

- 1 石声汉. 汜胜之书今释[M]. 北京:科学出版社, 1956.
- 2 MONDAL R C. Farming with a pitcher: a technique of water conservation[J]. World Crops, 1974, 262: 91-97.
- 3 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.
- 4 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.
- 5 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.
- 6 ABU-ZREIG M M, ATOUM F M. Hydraulic characteristics of clay pitchers produced in Jordan[J]. Canadian Biosystems Engineering, 2004, 46(1): 15-20.
- 7 SAMMIS T W. Comparison of sprinkler, trickle, subsurface, and furrow irrigation methods for row crops[J]. Agronomy Journal, 1980, 72(5): 701-704.
- 8 AL-JAMAL M S, BALL S, SAMMIS T W. Comparison of sprinkler, trickle and furrow irrigation efficiencies for onion production[J]. Agricultural Water Management, 2001, 46(3): 253-266.
- 9 AYARS J E, PHENE C J, HUTMACHER R B, et al. Subsurface drip irrigation of row crops: a review of 15 years of research at the water management research laboratory[J]. Agricultural Water Management, 1999, 42(1): 1-27.
- 10 BATCHELOR C, LOVELL C, MURATA M. Simple microirrigation techniques for improving irrigation efficiency on vegetable gardens[J]. Agricultural Water Management, 1996, 32(1): 37-48.
- 11 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.
- 12 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.
- 13 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.

- 14 ASHRAFI S, GUPTA A D, BABEL M S, et al. Simulation of infiltration from porous clay pipe in subsurface irrigation[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2002, 47(2): 253 – 268.
- 15 BAINBRIDGE D A. Buried clay pot irrigation; a little known but very efficient traditional method of irrigation[J]. *Agricultural Water Management*, 2001, 48(2): 79 – 88.
- 16 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.
- 17 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.
- 18 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.
- 19 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.
- 20 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.
- 21 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)
- 22 蔡耀辉, 吴普特, 朱德兰, 等. 硅藻土微孔陶瓷灌水器制备工艺优化[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(22): 70 – 76.
CAI Yaohui, WU Pute, ZHU Delan, et al. Preparation technology optimization of diatomite porous ceramic irrigation emitter[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(22): 70 – 76. (in Chinese)
- 23 李向明, 杨建国. 微孔陶瓷灌水器的流量影响因素研究[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(4): 73 – 78, 89.
LI Xiangming, YANG Jian'guo. Study of the factors influencing the flow rate of the microporous ceramic irrigation emitters[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(4): 73 – 78, 89. (in Chinese)
- 24 HAJJAJI M, MEZOUZRI H. A calcareous clay from Tamesloht (Al Haouz, Morocco): properties and thermal transformations [J]. *Applied Clay Science*, 2011, 51(4): 507 – 510.