

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.027

粘土基微孔陶瓷渗灌水器制备与性能优化^{*}

蔡耀辉¹ 吴普特^{1,2} 朱德兰^{1,2} 李向明^{1,2} 张林² 陈俊英^{1,2}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 提出了一种渗灌用粘土基微孔陶瓷的低成本制备工艺, 通过对比不同制备工艺对粘土基微孔陶瓷的抗弯强度、线收缩率和开口孔隙率的影响规律, 筛选出综合具有较高抗弯强度、较小线收缩率和较高开口孔隙率微孔陶瓷的最佳制备工艺。研究表明: 烧结温度及炉渣的掺量和粒径对粘土基微孔陶瓷的物相成分、抗弯强度、线收缩率、开口孔隙率和微观结构有较大影响。其中, 烧结温度为 1 075℃, 炉渣掺量质量分数为 10% ~ 30% 的粗颗粒粘土基微孔陶瓷具有 9.0 ~ 11.0 MPa 的抗弯强度、3.8% ~ 4.7% 的线收缩率和 36.8% ~ 44.8% 的开口孔隙率, 是制备渗灌水器的理想材料。

关键词: 渗灌 水器 微孔陶瓷 粘土 炉渣 开口孔隙率

中图分类号: S275 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)04-0183-06

Preparation and Performance Optimization of Clay-based Porous Ceramics Used in Subsurface Irrigation

Cai Yaohui¹ Wu Pute^{1,2} Zhu Delan^{1,2} Li Xiangming^{1,2} Zhang Lin² Chen Junying^{1,2}

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

2. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Subsurface irrigation has been realized by burying pots, pitchers and subsurface porous pipe, but the present preparation process of porous ceramics could not meet the performance requirements of subsurface irrigation emitters. A new preparation process of clay-based porous ceramics used for subsurface irrigation with minimal cost was explored. The effects of the preparation process (sintering temperature, contents and particle size of slag in the green body) on flexural strength, linear shrinkage and open porosity of porous ceramic were discussed. Finally, the optimal preparation process of porous ceramic with high flexural strength, low linear shrinkage and elevated open porosity were selected. The results showed that the sintering temperature and the contents and particle size of slag in the green body were three key factors influencing the properties of porous ceramics. When sintering temperature was 1 075℃ along with content of slag in the green body between 10% and 30%, the porous ceramics showed the best performance with maximum particle size of 0.613 mm. Flexural strength of porous ceramic was 9.0 ~ 11.0 MPa with open porosity of 36.8% ~ 44.8% and the linear shrinkage was 3.8% ~ 4.7%. Therefore, the clay-based porous ceramic could be the appropriate material for subsurface irrigation emitter.

Key words: Subsurface irrigation Irrigation emitter Porous ceramic Clay Slag Open porosity

收稿日期: 2014-06-23 修回日期: 2014-08-21

^{*} 国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心再建项目资助项目(2011FU125Z27-1)、高等学校学科创新引智计划(111计划)资助项目(B12007)、国家自然科学基金资助项目(51479172、51209177)和西北农林科技大学基本科研业务专项资金资助项目(2014YB061、QN2012024)

作者简介: 蔡耀辉, 博士生, 主要从事节水灌溉新技术研究, E-mail: yaohui_cai@163.com

通讯作者: 吴普特, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源高效利用研究, E-mail: gjzwpt@vip.sina.com

引言

微孔陶瓷应用于节水灌溉由来已久,早在两千多年前,中国就有关于陶罐灌溉的记载^[1]。至今,这种灌溉方式在伊朗、印度、约旦等干旱和半干旱地区仍被广泛应用^[2-4],其应用形式已演变为渗灌^[5]、地下灌溉^[6-7]、负压灌溉^[8-13]和零压灌溉^[14]等。这些灌溉形式多以陶罐、瓦管和陶土头等作为终端渗水装置,灌溉水通过渗水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^[2],因此这种灌溉方式下作物具有非常高的水分利用效率。

近20年来,微孔陶瓷研究的热点主要集中于微孔 Si_3N_4 、 Al_2O_3 等高性能陶瓷^[15-17]。这类材料虽具有较高力学性能和孔隙率,但较高的制造成本、复杂的制备工艺却限制了其在节水灌溉上的应用。因此,渗灌用微孔陶瓷多采用廉价易得的粘土作为原料,采用简单快捷的成型工艺以降低制造成本。

近年来,随着微孔陶瓷在渗灌领域的应用被广泛关注,国外学者对影响微孔陶瓷渗水速率的因素进行了研究^[18-19]。Stein研究表明,地理陶罐的渗水速率主要受陶罐渗透系数和土壤蒸发等因素的影响^[19]。Abu-Zreig在对比不同孔隙率微孔陶瓷在空气中的渗流情况后,发现微孔陶瓷的孔隙率会直接影响其渗透系数,进而影响其渗水速率^[18,20]。Bainbridge研究发现烧结温度是影响微孔陶瓷孔隙率的主要因素,建议陶罐的适宜烧结温度应低于 $1\ 100\text{ }^\circ\text{C}$ ^[2]。Stein研究表明原料的类型对微孔陶瓷的孔隙率也有较大影响^[21]。因此,原料和烧结温度会间接对微孔陶瓷的渗水速率造成影响。

综上,较高的孔隙率是渗灌用微孔陶瓷应具备的主要性能,但高的孔隙率会严重降低微孔陶瓷的力学性能,进而影响微孔陶瓷终端渗水装置的使用寿命,因此,渗灌用微孔陶瓷应综合具有较高的力学性能和孔隙率。但是,目前已有的制备工艺难以满足终端渗水装置对粘土基微孔陶瓷高力学性能、低收缩率和高孔隙率的要求^[22-23]。Monteiro等通过添加石油废料制备出抗弯强度为 $3.4\sim 12.1\text{ MPa}$ 、开口孔隙率为 $23.2\%\sim 26.6\%$ 的粘土基微孔陶瓷,但是其线收缩率高达 $5.6\%\sim 9.5\%$ 。过高的线收缩率会导致微孔陶瓷微观结构不均匀,继而严重影响终端渗水装置的灌水均匀度,而且难以满足其装配精度^[22]。

本文以粘土为主要原料,以炉渣和硅溶胶为性能改良剂,研究烧结温度、炉渣掺量和炉渣粒径对粘土基微孔陶瓷物相成分、抗弯强度、线收缩率、开口孔隙率和微观结构的影响,并筛选出具有较高抗弯

强度、较小线收缩率和较高开口孔隙率微孔陶瓷的最佳制备工艺,最终确定一种渗灌用粘土基微孔陶瓷的低成本制备工艺。

1 材料与方法

1.1 制备过程与试验设计

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,按照国际土壤分类方法,土壤类型为粘壤土。将其水洗、干燥、破碎、混合均匀、过80目筛(粒径 $0\sim 0.178\text{ mm}$)后置于有机玻璃土箱中封存。炉渣取自中国旱区节水农业研究院锅炉房,取样后水洗、干燥;取部分过30目筛(粒径 $0\sim 0.613\text{ mm}$)待用,剩余部分置于行星球磨机中高速球磨(自转转速 250 r/min 、公转转速 400 r/min)2 h,过80目筛待用;硅溶胶为市售工业制剂,其中 SiO_2 质量分数为 $(30\pm 1)\%$, SiO_2 平均粒径为 $8\sim 15\text{ nm}$ 。

原料制备完成后,将炉渣按表1的掺量与粘土混合,加入适量硅溶胶搅拌后倒入模具中在 6 MPa 压力下成型并阴干;将试样在箱式炉中按表1中的设计温度烧结2 h,冷却后即成为粘土基微孔陶瓷渗灌水器,工艺流程如图1所示。通过前期预试验,本文选用粘土基微孔陶瓷烧结温度范围为 $1\ 050\sim 1\ 100\text{ }^\circ\text{C}$ (表2),试验采用完全组合,共18种处理。

表1 试验因素水平

Tab.1 Factors and levels of experiment

水平	因素		
	烧结温度/ $^\circ\text{C}$	炉渣掺量质量 分数/%	炉渣类型及 最大粒径/mm
1	1 050	10	粗 0.613 (C)
2	1 075	30	细 0.178 (F)
3	1 100	50	

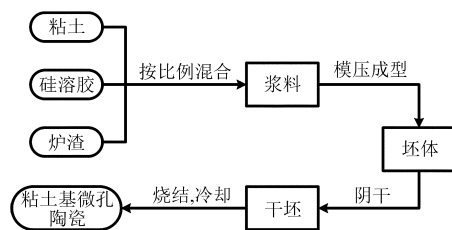


图1 工艺流程图

Fig.1 Flow chart of preparation of clay-based porous ceramic

高温烧结时,坯体中的炉渣有3方面的作用:

- ①炉渣中大量的残余碳在高温燃烧后,会在试样内部留下相互连通的微孔,起到造孔剂的作用,增加粘土基微孔陶瓷的孔隙率,炉渣的微结构如图2所示。
- ②炉渣中大量的非晶态 SiO_2 会将试样中的颗粒拉

近,并与粘土中的 Al_2O_3 和 CaO 反应生成钙铝石,增加粘土基微孔陶瓷的力学性能。③炉渣中的碳在高温燃烧时生成的 CO_2 可在炉膛内产生一个保护性气氛,有效抑制方石英的生成^[23],从而提高粘土基微孔陶瓷的力学性能。

表 2 试验处理

Tab. 2 Experiment treatments

处理序号	编号	烧结温度/°C	炉渣掺量质量分数/%	炉渣类型
1	C10-1050	1 050	10	C
2	F10-1050	1 050	10	F
3	C30-1050	1 050	30	C
4	F30-1050	1 050	30	F
5	C50-1050	1 050	50	C
6	F50-1050	1 050	50	F
7	C10-1075	1 075	10	C
8	F10-1075	1 075	10	F
9	C30-1075	1 075	30	C
10	F30-1075	1 075	30	F
11	C50-1075	1 075	50	C
12	F50-1075	1 075	50	F
13	C10-1100	1 100	10	C
14	F10-1100	1 100	10	F
15	C30-1100	1 100	30	C
16	F30-1100	1 100	30	F
17	C50-1100	1 100	50	C
18	F50-1100	1 100	50	F

注:后文为叙述便利,采用 CA-T 或 FA-T 表示微孔陶瓷的配比及烧结温度,其中 C 代表粗颗粒、F 代表细颗粒;A 代表炉渣掺量质量分数;T 代表烧结温度。

硅溶胶中包含的大量纳米级非晶态 SiO_2 有 2 方面的作用:①在坯体模压时,作为粘接剂提高坯体的强度,有助于坯体的脱模。②在烧结时,作为烧结助剂提高微孔陶瓷的强度。炉渣的扫描电子显微照片(SEM)和衍射图谱(XRD)如图 2 所示。

1.2 测试指标与方法

炉渣和微孔陶瓷的物相成分采用 X 射线衍射仪(XRD,X'Pert Pro,Philips,荷兰)进行分析,扫描角度为 $10^\circ \sim 70^\circ$,扫描速度为 $5^\circ/\text{min}$ 。炉渣和微孔陶瓷的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 $3\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 40\text{ mm}$,跨距为 30 mm ,加载速度 $0.5\text{ mm}/\text{min}$,测试结果取 3 个样品的平均值。密度和开口孔隙率采用阿基米德排水法测试,测试结果取 6 个样品的平均值。微孔陶瓷的径向线收缩率计算式为

$$\eta = \frac{D_0 - D_1}{D_0} \times 100\% \quad (1)$$

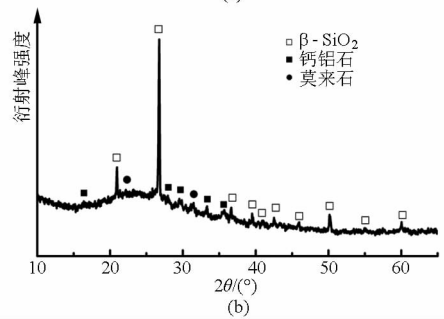
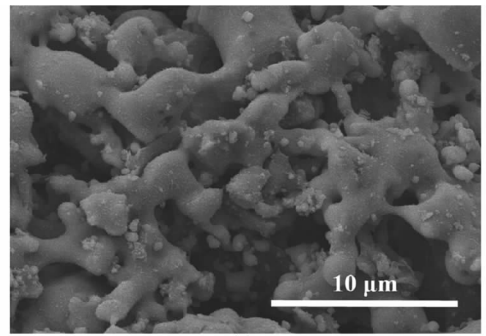


图 2 炉渣的 SEM 照片与 XRD 图谱
Fig. 2 SEM micrographs and XRD pattern of slag

式中 D_0 ——烧结前坯体的直径
 D_1 ——烧结后微孔陶瓷的直径

2 结果与讨论

2.1 物相成分分析

图 3 为 F10-1100、F30-1100 和 F50-1100 3 种微孔陶瓷的 XRD 图谱。炉渣中大量的残余碳会有效抑制 $\beta-SiO_2$ 向方石英的转变^[24],因此随着炉渣掺量由 10% 增加到 50%,方石英的衍射峰逐渐降低。另外,随着炉渣掺量的增加,钙长石($CaAl_2Si_2O_8$)和钙铝石($CaAl_2O_4$)的衍射峰没有明显变化,但随着 $\beta-SiO_2$ 和方石英衍射峰的显著降低,微孔陶瓷中 $CaAl_2Si_2O_8$ 和 $CaAl_2O_4$ 的含量相对增加。

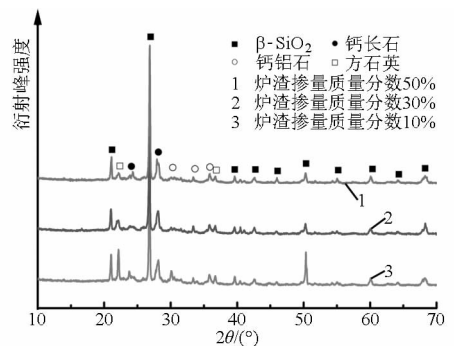


图 3 F10-1100、F30-1100 和 F50-1100 的 XRD 图谱
Fig. 3 XRD patterns of F10-1100, F30-1100 and F50-1100

根据衍射图谱半定量计算微孔陶瓷中各成分的含量,结果如表 3 所示。可以看出,当炉渣掺量为 10% 时,微孔陶瓷中钙长石 $CaAl_2Si_2O_8$ 和钙铝石

CaAl_2O_4 的总质量分数约为 17%；当炉渣掺量为 30% 时,微孔陶瓷中 $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ 和 CaAl_2O_4 的总质量分数约为 22%；随着炉渣掺量增至 50%,微孔陶瓷中 $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ 和 CaAl_2O_4 的总质量分数增至 27%。另外,当炉渣掺量为 10% 时,由于坯体中碳含量不足,坯体在高温烧制时,大量的 $\beta\text{-SiO}_2$ 会转变为方石英,此时微孔陶瓷中的方石英含量较高,约为 20%；当炉渣掺量增至 30% 时,坯体中的碳含量增加会有效抑制方石英的生成,此时微孔陶瓷中的 $\beta\text{-SiO}_2$ 虽然有所增加,但方石英的含量由 20% 显著降至 10%；随着炉渣掺量继续增至 50%,坯体中碳的抑制析晶作用更强,此时微孔陶瓷中方石英的含量进一步降至 8%。根据上述结果可知,坯体中炉渣含量的增加,一方面能够增加微孔陶瓷中 $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ 和 CaAl_2O_4 的含量,提高微孔陶瓷的力学性能,另一方面可以显著降低微孔陶瓷中方石英的含量,进一步提高微孔陶瓷的力学性能。

表 3 微孔陶瓷中各成分的质量分数

Tab.3 Content of different compositions

in porous ceramics					
炉渣掺量	钙长石	钙铝石	$\beta\text{-SiO}_2$	方石英	其他
10	11	6	61	20	2
30	15	7	65	10	3
50	18	9	63	8	2

2.2 抗弯强度、线收缩率和开口孔隙率

用于制备渗灌灌水的粘土基微孔陶瓷,应综合具有较高的抗弯强度、较小的线收缩率和较大的开口孔隙率。渗灌灌水器在使用过程中会受到土压力、地面垂直荷载及水压力等外界荷载,因而需具有一定的强度,同时灌水器也应满足在运输安装过程中的强度要求。坯体在高温烧制时,炉渣中大量的非晶态 SiO_2 处于液态,这些液态的 SiO_2 会将坯体中的颗粒拉近,一方面会增加颗粒间的粘接强度,提高微孔陶瓷的抗弯强度;另一方面会增加微孔陶瓷的线收缩率,并导致开口孔隙率的下降。而且随着烧制温度的升高,上述现象更为明显。图 4 为粘土基

微孔陶瓷的抗弯强度、线收缩率和开口孔隙率。如图 4a 所示,随着烧制温度的升高,微孔陶瓷的抗弯强度逐渐增加。以 C30 和 F30 为例,随着烧制温度由 1050℃ 增至 1100℃,C30 的抗弯强度由 6.5 MPa 增至 11.0 MPa, F30 的抗弯强度由 4.0 MPa 增至 8.0 MPa。

粗颗粒炉渣为空间多孔结构,高温烧制时,炉渣的这种结构会有效抑制微孔陶瓷的收缩。如图 4b 所示,随着烧制温度由 1050℃ 升至 1100℃,粗颗粒微孔陶瓷的线收缩率变化较小,以 C30 为例,其线收缩率基本保持不变,维持在 4.5% 左右。对于细颗粒炉渣,球磨工艺会严重破坏其空间多孔结构,无法阻止微孔陶瓷在高温烧制时的收缩,而其内部较多的非晶态 SiO_2 反而会引起微孔陶瓷的收缩。以 F30 为例,随着温度由 1050℃ 升高至 1100℃,其线收缩率由 3.6% 增至 4.2%。

通常,微孔陶瓷的孔隙率和收缩率呈负相关关系。对比图 4b 和 4c 可以看出,随着烧制温度由 1050℃ 升至 1100℃,粗颗粒微孔陶瓷的线收缩率变化不大,因此其开口孔隙率同样变化较小;细颗粒微孔陶瓷的线收缩率增加,导致其开口孔隙率降低。随着温度由 1050℃ 升至 1100℃,C30 的开口孔隙率维持在 39.2% ~ 44.8% 左右;F30 的开口孔隙率由 50.0% 降至 38.3%。

炉渣掺量同样会影响微孔陶瓷的抗弯强度、线收缩率和开口孔隙率。如图 4 所示,随着炉渣掺量的增加,炉渣中原始的多孔结构会增加坯体的孔隙率,而且炉渣中大量的碳在高温烧制时被氧化去除,也会造成微孔陶瓷开口孔隙率的增加。较大的开口孔隙率会为微孔陶瓷的收缩留有更大余地,因此炉渣掺量的增加还导致了微孔陶瓷线收缩率的增大。另外,虽然炉渣掺量增加会抑制微孔陶瓷中方石英的生成,理论上能够提高微孔陶瓷的抗弯强度,但是开口孔隙率的增加会降低微孔陶瓷的抗弯强度。因此,随着炉渣掺量的增加,微孔陶瓷的抗弯强度最终呈现下降趋势。以 C-1075 为例,随着炉渣掺量由

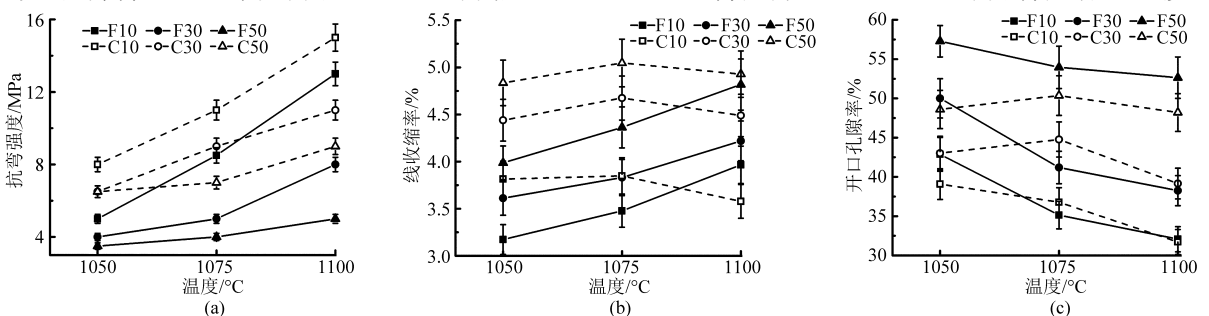
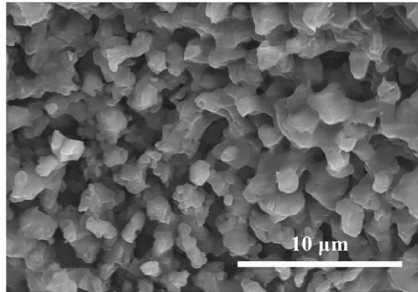


图 4 不同制备工艺对粘土基微孔陶瓷抗弯强度、线收缩率和开口孔隙率的影响

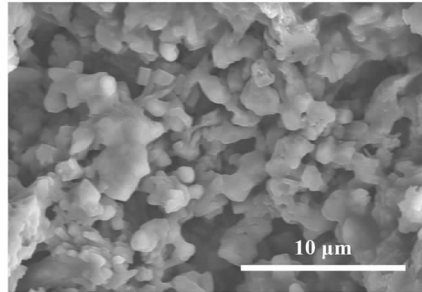
Fig.4 Effects of preparation process on flexural strength, linear shrinkage and open porosity of clay-based porous ceramics

10% 增至 50%, 其抗弯强度由 11.0 MPa 下降至 7.0 MPa; 线收缩率由 3.8% 增至 5.0%; 开口孔隙率由 36.8% 增至 50.4%。

基于抗弯强度、线收缩率和开口孔隙率的变化规律, 以及渗灌用微孔陶瓷的性能要求, 将抗弯强度低于 5 MPa, 线收缩率高于 5%, 开口孔隙率小于 35% 的微孔陶瓷排除, 剩下的 C10-1050、C10-1075、C30-1050、C30-1075、C30-1100 和 F30-1100 满足渗灌用微孔陶瓷的性能要求。



(a)



(b)

图5 F30-1100 和 C30-1100 的 SEM 照片

Fig. 5 SEM micrographs of F30-1100 and C30-1100

(a) F30-1100 (b) C30-1100

2.4 抗弯强度与开口孔隙率的关系

图6给出了粗、细2种粘土基微孔陶瓷抗弯强度与开口孔隙率的对应关系。如图6所示, 抗弯强度与开口孔隙率呈现负相关关系。随着开口孔隙率的增加2种微孔陶瓷的抗弯强度均逐渐下降。对于粗颗粒微孔陶瓷, 当开口孔隙率由 31.7% 增至 55.7% 时, 抗弯强度下降了约 8.5 MPa; 对于细颗粒微孔陶瓷, 当开口孔隙率由 32.1% 增至 57.3% 时, 抗弯强度则由 13.0 MPa 降至 3.5 MPa。另外, 对于具有相同抗弯强度的微孔陶瓷, 粗颗粒微孔陶瓷较细颗粒微孔陶瓷具有更高的开口孔隙率。

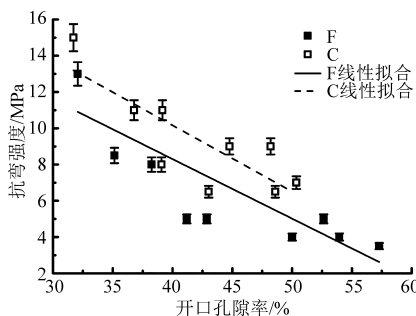


图6 粘土基微孔陶瓷开口孔隙率与抗弯强度的关系

Fig. 6 Flexural strength of clay-based porous ceramics as a function of open porosity

灌水器造价高是制约我国节水灌溉技术推广的瓶颈之一。本文中细颗粒粘土基微孔陶瓷的制备采用了球磨工艺, 不但没有改善微孔陶瓷的性能, 反而会导致制备成本的大幅度增加。另外, 过高的烧结温度虽对微孔陶瓷的抗弯强度有所改善, 但却在一

2.3 微观结构

图5给出了 F30-1100 与 C30-1100 的微观结构图。如图5a所示, F30-1100 采用细颗粒炉渣, 炉渣粒径与粘土颗粒粒径相差较小, 因而其微观结构较均匀, 孔径分布较集中。如图5b所示, C30-1100 采用粗颗粒炉渣, 虽其微观结构的均匀性比 F30-1100 差, 但其内部颗粒间的孔连通性更好, 更有利于灌溉水的运移。因此, C30-1100 更能满足渗灌灌水器的性能要求。

一定程度上增加了微孔陶瓷的线收缩率, 降低了其开口孔隙率。所以再次筛选后认为, C10-1075、C30-1075 为制备粘土基微孔陶瓷的较优工艺。

3 结论

(1) 炉渣掺量对粘土基微孔陶瓷的成分影响较大, 随着炉渣掺量的增加, 微孔陶瓷中的 β -SiO₂ 和方石英含量逐渐降低, 同时钙长石 (CaAl₂Si₂O₈) 和钙铝石 (CaAl₂O₄) 的含量逐渐增加。

(2) 烧结温度和炉渣掺量对粘土基微孔陶瓷的抗弯强度、线收缩率、开口孔隙率和微观结构均有影响。提高烧结温度会导致微孔陶瓷的抗弯强度增加、线收缩率增大和开口孔隙率降低; 炉渣掺量越高微孔陶瓷的开口孔隙率越高, 但会引起线收缩率的增大和抗弯强度的降低。

(3) 细颗粒微孔陶瓷的微观结构均匀, 孔径分布集中, 但是其内部的孔连通性不如粗颗粒微孔陶瓷, 会影响其渗水性能。

(4) 对于粗、细炉渣粒径的2种粘土基微孔陶瓷, 其抗弯强度与开口孔隙率均呈现负相关关系, 提高其抗弯强度会降低开口孔隙率。但在抗弯强度相同时, 粗颗粒微孔陶瓷具有更大的开口孔隙率, 而且粗颗粒微孔陶瓷的制造成本更低, 更适用于制备渗灌灌水器。

(5) 通过综合对比抗弯强度、线收缩率和开口孔隙率, 得出 C10-1075 和 C30-1075 2种粘土基微孔陶瓷最适用于制备渗灌灌水器。

参 考 文 献

- 1 石声汉. 汜胜之书今释[M]. 北京:科学出版社, 1956.
- 2 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.
- 3 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.
- 4 Mondal R C. Farming with a pitcher: a technique of water conservation[J]. *World Crops*, 1974, 262: 91-97.
- 5 谷川寅彦, 矢部腾彦, 吴景社. 低压渗灌原理与基础试验研究[J]. *灌溉排水*, 1992, 11(2): 35-38.
- 6 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.
- 7 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.
- 8 刘明池. 负压自动灌水蔬菜栽培系统的建立与应用[D]. 北京:中国农业科学院, 2001.
Liu Mingchi. Development and application of a new atuo-irrigating cultivation system with negative pressure[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2001. (in Chinese)
- 9 雷廷武, 江培福, Bralts V F, 等. 负压自动补给灌溉原理及可行性试验研究[J]. *水利学报*, 2005, 36(3): 298-302.
Lei Tingwu, Jiang Peifu, Bralts V F, et al. Principle of negative pressure difference irrigation system and feasibility experimental study[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(3): 298-302. (in Chinese)
- 10 江培福, 雷廷武, Bralts V F, 等. 土壤质地和灌水器材对负压灌溉出水流量及土壤水运移的影响[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(4): 19-22.
Jiang Peifu, Lei Tingwu, Bralts V F, et al. Effects of soil textures and emitter material on the soil water movement and efficiency of negatively pressurized irrigation system[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(4): 19-22. (in Chinese)
- 11 邹朝望, 薛绪掌, 张仁铎, 等. 负水头灌溉原理与装置[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(11): 17-22.
Zou Chaowang, Xue Xuzhang, Zhang Renduo, et al. Principle and equipment of negative pressure irrigation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(11): 17-22. (in Chinese)
- 12 李邵, 薛绪掌, 郭文善, 等. 负水头灌溉对温室番茄生长, 产量及品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(2): 225-229.
Li Shao, Xue Xuzhang, Guo Wenshan, et al. Effects of negative pressure irrigation on the growth, yield and quality of tomato in greenhouses[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(2): 225-229. (in Chinese)
- 13 肖娟, 江培福, 郭秀峰, 等. 负水头条件下水质对湿润体运移及水盐分布的影响[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(5): 101-107.
Xiao Juan, Jiang Peifu, Guo Xiufeng, et al. Effect of water quality on wetting front moving and salt-water distribution under negative hydraulic head[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(5): 101-107. (in Chinese)
- 14 陈新明, 蔡焕杰, 王占兵, 等. 无压根区地下灌溉技术试验研究[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(1): 76-79.
Chen Xinming, Cai Huanjie, Wang Zhanbing, et al. Experiment of non-pressure subsurface drip irrigation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(1): 76-79. (in Chinese)
- 15 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.
- 16 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.
- 17 Yoon B H, Choi W Y, Kim H E, et al. Aligned porous alumina ceramics with high compressive strengths for bone tissue engineering[J]. *Scripta Materialia*, 2008, 58(7): 537-540.
- 18 Abu-Zreig M M, Atoum F M. Hydraulic characteristics of clay pitchers produced in Jordan [J]. *Canadian Biosystems Engineering*, 2004, 46(1): 15-20.
- 19 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.
- 20 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.
- 21 Stein T M. Possibilities to vary the hydraulic conductivity of pitcher materials[J]. *Zeitschrift für Bewässerungswirtschaft*, 1996, 31(2): 165-181.
- 22 Monteiro S N, Vieira C M F. Effect of oily waste addition to clay ceramic[J]. *Ceramics International*, 2005, 31(2): 353-358.
- 23 Souza G P, Holanda J N F. Densification behaviour of petroleum waste bearing clay-based ceramic bodies [J]. *Ceramics International*, 2004, 30(1): 99-104.
- 24 Li X, Yin X, Zhang L, et al. The devitrification kinetics of silica powder heat-treated in different conditions[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2008, 354(28): 3254-3259.