

其他水系统研究与应用

刘同庆, 周驰, 郑恒, 等. 多孔陶瓷材料的制备及对饮用水的矿化试验[J]. 净水技术, 2023, 42(8):136-142, 156.

LIU T Q, ZHOU C, ZHENG H, et al. Preparation of porous ceramic materials and mineralization properties test for drinking water[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(8):136-142, 156.

多孔陶瓷材料的制备及对饮用水的矿化试验

刘同庆¹, 周驰², 郑恒¹, 赖涵¹, 黄庆¹, 王冬波^{3,*}

(1. 中南水务科技有限公司, 湖南长沙 410004; 2. 长沙水业集团有限公司, 湖南长沙 410004; 3. 湖南大学环境科学与工程学院, 湖南长沙 410006)

摘要 目前, 深度净化的饮用水在经过矿化后, 仍然缺少天然矿泉水中含有的微量元素锶等矿物质。为实现饮用水达到天然矿泉水的标准, 研究以麦饭石、硒矿石、天青石、镁矿石为主要原料, 辅以黏合剂和造孔剂, 通过磨粉、造球、煅烧等工艺制备出多孔陶瓷材料, 并开展矿化效果研究。结果表明, 多孔陶瓷材料的最佳制备条件: 造孔剂碳酸氢铵用量为 5%、黏合剂硅酸钠用量为 0, 煅烧温度为 1 200 °C, 保温时间为 1 h; 以天然矿泉水中锶的限值为评价标准, 材料在 500 mL/min 和 1 000 mL/min 流量下可稳定运行 70 d, 处理水量分别为 50、100 m³, 且无重金属超标的风险。多孔陶瓷材料具备良好的溶出安全性和稳定性, 可作为良好的矿化材料用于富锶矿泉水的制备。

关键词 天然矿泉水 锶 多孔陶瓷材料 矿化 安全性

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2023)08-0136-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.08.016

Preparation of Porous Ceramic Materials and Mineralization Properties Test for Drinking Water

LIU Tongqing¹, ZHOU Chi², ZHENG Heng¹, LAI Han¹, HUANG Qing¹, WANG Dongbo^{3,*}

(1. Central South Water Science and Technology Co., Ltd., Changsha 410004, China;

2. Changsha Water Group Co., Ltd., Changsha 410004, China;

3. College of Environmental Science & Engineering, Hunan University, Changsha 410006, China)

Abstract At present, the advanced purified drinking water purification still lacks strontium and other minerals contained in natural mineral water. In order to achieve the standard of natural mineral water, principal raw materials such as medical stone, selenium ore, celestite and magnesium ore as the main raw materials, supplemented by adhesives and porogen, prepared porous ceramic materials through grinding, ball making and calcination, and study on effect of mineralization was carried out. The results showed that the best preparation conditions for porous ceramic material were as follows: the dosage of ammonium bicarbonate was 5%, the dosage of sodium silicate was 0, the calcination temperature was 1 200 °C, and the holding time was 1 h. With the limit value of strontium in natural mineral water as the evaluation standard, the material could run stably for 70 days at the flow rate of 500 mL/min and 1 000 mL/min, and the water volume could be treated with 50, 100 m³, respectively, without the risk of excessive heavy metals. Porous ceramic material has good dissolution safety and stability, which can be used as a good mineralization material for the preparation of strontium-rich mineral water.

Keywords natural mineral water strontium porous ceramic material mineralization safety

[收稿日期] 2022-07-13

[基金项目] 国家青年科学基金项目(52200152)

[作者简介] 刘同庆(1991—), 男, 博士, 研究方向为水务新技术、新工艺、新产品, E-mail: Tongqliu@whu.edu.cn。

[通信作者] 王冬波(1981—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为水污染控制, E-mail: w.dongbo@yahoo.com。

饮用水是除食物外补充人体所需元素的重要途径,水的品质也将直接影响人的健康。不含任何矿物元素的纯净水虽然其纯净度比较高,但是会导致水体稳定性变差^[1-2]。长期饮用纯净水会对人体健康产生负面影响,使得人体缺乏必需的常量及微量元素。研究^[3-5]表明,长期饮用纯净水会造成骨骼发育不良、免疫力下降等健康风险。

目前街道及家庭直饮水系统均含有膜滤装置,该装置在有效净化水质的同时也截留了水中大量的矿物质,减少了直饮水中有益矿物元素的含量,人体长期饮用可能对身体健康产生负面影响。为解决直饮水中矿物质含量过低的问题,需要对膜滤后的直饮水进行再矿化处理,即通过一定的方法来增加直饮水中的离子含量。矿化的方法大致分为3类:一是直接投加药剂法;二是与其他水源掺混;三是溶解矿石法^[6-10]。其中溶解矿石法与天然矿泉水的形成过程最为接近,是水矿化研究的主要方法。

溶解矿石法的研究核心是矿石材料的选取,目前在相关领域已取得了一定的研究成果。赵葆等^[11]利用包括麦饭石在内的4种矿石材料开展矿化研究,考察了水力停留时间和pH对矿化效果的影响,结果表明,水流量越小,水力停留时间越长,越有利于元素溶出;pH越低,元素溶出量越多,且其中扇贝壳组在矿物质总量和锶的溶出方面表现突出。李淑娜等^[12]采用石灰石溶解法对淡化水进行再矿化,以盐酸对淡化水进行酸化,考察酸化水pH值(2.0、2.3、3.0)及矿化塔内停留时间(3、8、12、24、36、48、60 min)对矿化效果的影响,并计算酸化后的利用效率。结果表明,酸化水pH值应不大于3,且随酸化水pH减小,矿化水硬度、碱度越高;随水力停留时间变长,矿化水硬度、碱度越高,酸的有效利用率也越高。有学者^[13]研发了一种安全并且健康的可调节饮用水酸碱性的产品——弱碱性复合滤芯,研究对麦饭石、海泡石等矿石进行改性处理,通过物理化学改性方法改变矿物晶体结构,使矿物溶解沉淀能力加强,同时利用酸洗和微波打通矿物的盲通道,增加矿物的溶解吸附能力,改性后复合滤芯锶的溶出含量能够达到天然矿泉水的标准。此复合滤芯虽然性能优良,但是由于研发的矿化滤芯制备工艺复杂、成本较高,且其属于个性化产品,只适用于家庭直饮水场景。而市面上的矿化滤芯产品种类繁多且成本低廉,但矿化效果却一般,所以打造溶出

高效、无需额外加酸碱调控且成本可控的矿化滤芯是研究的重点。

为达到高效矿化的目的,本研究以麦饭石、矽矿石、天青石和镁矿石4种天然矿石为原料,采用硬模板法制备出具有一定孔隙率、高抗压强度的多孔陶瓷材料^[14-15];将制得的多孔陶瓷材料运用于直饮纯净水的矿化,具有优良的溶出安全性和稳定性;且微量元素锶的溶出量能够达到天然矿泉水的水平。试验通过制备多孔陶瓷材料用于水的矿化研究,材料矿化性能显著,对矿化设备开发具有重要参考意义。

1 材料与方法

1.1 试验所用主要原料

试验过程中所用到的主要原料,如表1所示。

表1 试验所用主要原料

试验原料	名称	原料产地
骨架材料	麦饭石	石家庄托玛琳矿产品有限公司
	矽矿石	大冶市锦鹏摩擦材料有限公司
	天青石	东海县牛山东灵珠宝商行
	镁矿石	盐城华耐镁业有限公司
黏合剂	硅酸钠	中国医药集团有限公司
造孔剂	碳酸氢铵	中国医药集团有限公司

1.2 试验仪器

试验中主要用到的仪器设备,如表2所示。

表2 试验所用主要仪器设备

设备名称	型号	厂商
箱式炉	HLX-16B	洛阳恒立窑炉有限公司
圆盘造粒机	500型	郑州欧熙机械设备有限公司
粉碎机	ZX-800Y	永康市泰禾工贸有限公司
电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)	ICP-MS 7900	美国安捷伦科技有限公司

1.3 多孔陶瓷材料制备试验方案

根据他人文献^[16-18]关于多孔陶瓷材料制备的研究,试验考察了造孔剂、黏合剂、煅烧温度和保温时间4个因素对多孔陶瓷材料制备的影响,选择4因素3水平的正交试验方案,以材料是否瓷化为目标。正交试验的设计方案如表3和表4所示。

1.4 多孔陶瓷材料的制备

1.4.1 矿粉的制备

将麦饭石、矽矿石、天青石、镁矿石按一定的比

表 3 正交试验 $L_9(3^4)$ 方案
Tab. 3 Scheme of Orthogonal Test $L_9(3^4)$

水平	造孔剂用量 A (质量分数)	黏合剂用量 B (质量分数)	煅烧温 度 C/℃	保温时 间 D/h
1	A ₁ %	B ₁ %	C ₁	D ₁
2	A ₁ %	B ₂ %	C ₂	D ₂
3	A ₁ %	B ₃ %	C ₃	D ₃
4	A ₂ %	B ₁ %	C ₂	D ₃
5	A ₂ %	B ₂ %	C ₃	D ₁
6	A ₂ %	B ₃ %	C ₁	D ₂
7	A ₃ %	B ₁ %	C ₃	D ₂
8	A ₃ %	B ₂ %	C ₁	D ₃
9	A ₃ %	B ₃ %	C ₂	D ₁

表 4 正交试验因素水平
Tab. 4 Factor Level of Orthogonal Test

水平	造孔剂用量 A (质量分数)	黏合剂用量 B (质量分数)	煅烧温 度 C/℃	保温时 间 D/h
1	0	0	8 00	4
2	5%	10%	1 000	6
3	10%	20%	1 200	8

例混合后在搅拌机中充分搅拌,待矿石材料充分打磨成矿石粉末后过 250 目筛,筛选得到的矿粉作为骨料。

1.4.2 配料

将上述矿石粉末和黏合剂、造孔剂按一定质量配比复合搅拌、混合均匀后备用。

1.4.3 制胚

将固体混合物均匀倒入圆盘造粒机中,以喷淋的方式加入一定量的水,进行造粒,然后对造粒后的胚体进行筛分,筛出 6~12 mm 的颗粒胚体^[19]。

1.4.4 干燥

将成型的滤芯胚体置于 60 ℃ 恒温干燥箱中干燥处理 30 min 左右,然后冷却至室温备用。

1.4.5 煅烧

将干燥好的胚体材料放入马弗炉中,以 20 ℃/min 的速度升温至 1 200 ℃,然后在 1 200 ℃ 的温度条件下恒温 1 h,接着以 20 ℃/min 的速度降至室温,即得到多孔陶瓷材料。

1.5 多孔陶瓷材料的表征

1.5.1 抗压强度

抗压强度是材料的重要参数之一。陶瓷材料所

对应的抗压强度是指对陶瓷材料缓慢施加压力,当材料即将要发生形变的时候,其单位面积上所能够承受的最大压力^[20]。

对于多孔陶瓷材料来说,比表面积和孔隙率越大,与水接触越充分,就越有利于多孔陶瓷材料中矿物元素的溶出,为了使得陶瓷材料具备较高孔隙率和较大的比表面积,往往需要在制备过程中添加一定量的造孔剂。然而,通常过大的孔隙率和比表面积会导致材料的抗压强度有所降低,因此,本研究的一个关键点在于保障多孔陶瓷材料有足够大孔隙率的同时具备一定的抗压强度^[21]。

材料的抗压强度计算如式(1)。

$$P = F/S \quad (1)$$

其中: P ——材料抗压强度,MPa;

F ——材料发生形变时所受到的最大压力,N;

S ——材料的受力面积,m²。

1.5.2 孔隙率

对于材料孔隙率的测定,试验利用的是阿基米德原理,主要是通过测定材料在吸水前后的质量变化,从而计算出两者的质量差。再结合相应温度下水的密度,计算得出多孔陶瓷材料孔隙中水的体积,即对应的孔隙体积。

多孔材料的孔隙率由式(2)计算得到。

$$K = \frac{(M_2 - M_1)/\rho_{\text{水}}}{\pi R^2 H} \times 100\% \quad (2)$$

其中: K ——材料的孔隙率;

M_1 ——材料在吸水前的质量,g;

M_2 ——材料在吸水后的质量,g;

R ——材料的半径,cm;

H ——材料的高度,cm;

$\rho_{\text{水}}$ ——水的密度,g/cm³。

1.5.3 形貌表征

透射电子显微镜(TEM)是研究多孔材料最直接的手段之一,它可以直接将多孔材料的局部显微结构放大百万倍,便于孔隙的观察和孔径的测定,这些结构称为亚显微结构或超微结构^[22-23]。

1.6 材料的矿化性能

试验方法按照《生活饮用水输配水设备及防护材料卫生安全评价规范》(GB/T 17219—1998)中的

规定执行。流动性试验的目的是对材料的矿化性能进行研究,流动性试验装置如图 1 所示。装置主要由 1 个蠕动泵、3 根填料柱、阀门和流量计组成;填料柱的尺寸为 $\Phi 60 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$,其中陶瓷材料的使用量为 0.5 kg,通过调节阀门的大小控制水的流

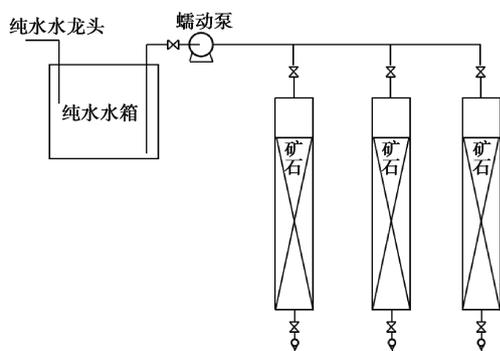


图 1 填料柱试验装置

Fig. 1 Device of Filler Column Test

量,蠕动泵的流量为 0~6 L/min;流动柱的出水流量由流量计监控。

2 试验结果与讨论

2.1 多孔陶瓷材料制备试验结果

多孔陶瓷材料正交试验结果如表 5 所示。

由表 5 可知,只有煅烧温度达到 1 200 °C 时,矿石材料才能完全瓷化,说明温度对材料制备的影响最大;而造孔剂、黏合剂对材料能够瓷化与否并无影响。材料气孔率与造孔剂使用量是正相关关系,而抗压强度与造孔剂使用量是负相关关系,为保证材料具有一定的气孔率和较大的抗压强度,确定造孔剂的使用量为 5%;而黏合剂对材料的性能几乎无影响。综上,多孔陶瓷材料在最终制备过程中造孔剂的用量为 5%,黏合剂的用量为 0,煅烧温度为 1 200 °C,优化后的保温时间为 1 h。

表 5 正交试验结果

Tab. 5 Results of Orthogonal Test

水平	造孔剂用量 A (质量分数)	黏合剂用量 B (质量分数)	煅烧温度 C/°C	保温时间 D/h	是否瓷化	气孔率	抗压强度/MPa
1	0	0	800	4	否	/	/
2	0	10%	1 000	6	否	/	/
3	0	20%	1 200	8	是	6.57%	1.68
4	5%	0%	1 000	8	否	/	/
5	5%	10%	1 200	4	是	14.38%	0.89
6	5%	20%	800	6	否	/	/
7	10%	0	1 200	6	是	21.15%	0.54
8	10%	10%	800	8	否	/	/
9	10%	20%	1 000	4	否	/	/

2.2 多孔陶瓷材料微观结构

为了进一步了解多孔陶瓷材料中的孔隙形貌、分布及其大小,对材料进行扫描电子显微镜(SEM)形貌分析,所得到的结果如图 2 所示。

通过材料的表面 SEM 形貌图可知,材料的表面孔隙较多,约为 30 μm ,气孔的分布较为均匀;材料的比表面积检测值为 1.7 m^2/g ,因此,材料具备一定的比表面积。

2.3 多孔陶瓷材料的矿化性能

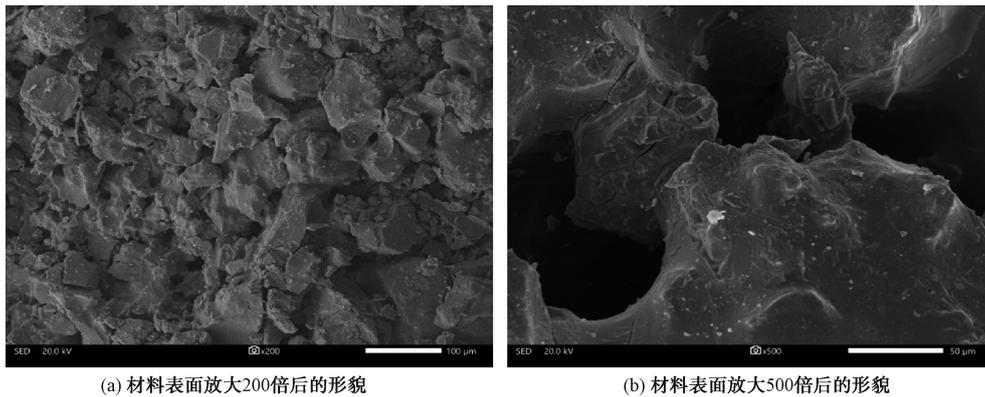
2.3.1 多孔滤芯材料的溶出安全性

固定材料的量为 0.5 kg,加入纯水至刚好浸没材料,浸泡时间分别为 1、2、4、8、16、24、48、72 h,检

测指标按照《生活饮用水输配水设备及防护材料卫生安全评价规范》(GB/T 17219—1998)的要求进行检测,结果如图 3 所示。

由图 3 可知,在浸泡的前 8 h 内,各元素浓度上升较快,而后上升的趋势不明显;当浸泡时间达到 72 h 时,材料中的铝元素溶出才有超标的风险,而其他元素无超标风险。《生活饮用水输配水设备及防护材料卫生安全评价规范》(GB/T 17219—1998)规定,材料在 24 h 内无金属元素超标即满足卫生要求,说明陶瓷材料具备较好的溶出安全性。

对上述元素溶出量与时间的关系进行研究,经过拟合发现元素溶出量与时间呈对数关系,如式(3)。



(a) 材料表面放大200倍后的形貌

(b) 材料表面放大500倍后的形貌

图2 材料的表面SEM形貌

Fig. 2 Surface SEM Topography of Materials

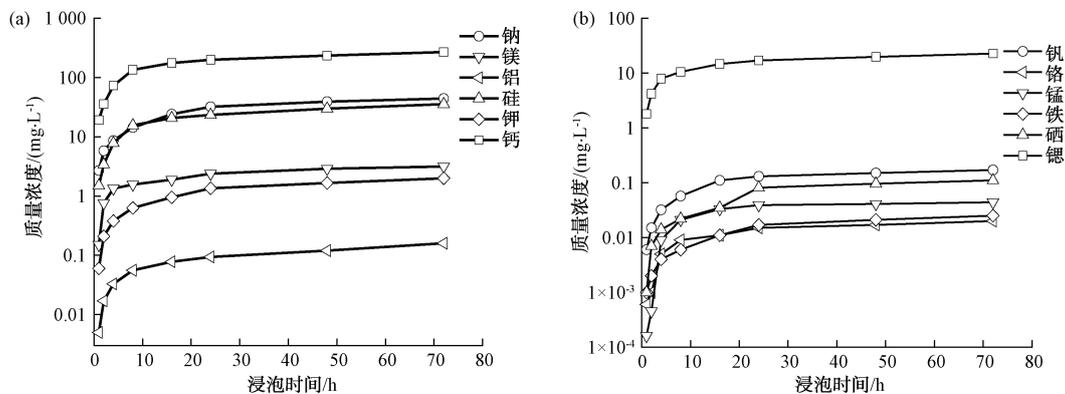


图3 滤芯材料随浸泡时间的变化

Fig. 3 Changes of Filter Element Material with Immersion Time

$$C = k \log_{10}(t+1) \quad (3)$$

其中: C ——元素溶出量, mg/L;

k ——常数;

t ——时间, h。

拟合得到材料各元素溶出量与时间的对应关系如表6所示。

2.3.2 多孔陶瓷材料矿化性能与流量的关系

在不同流量下对陶瓷材料开展溶出性能研究,材料在不同流量下的元素溶出情况如图4所示。由图4可知,材料元素溶出量随流量的增大而逐渐下降,在较大流量范围内,材料能溶出钙、镁、钠、硒和锶5种矿物元素,其中硒和锶属于人体所必需的微量元素,且硒和锶分别来源于材料中的硒矿石、天青石;矿物元素溶出量方面,钙和锶的溶出量明显高于其他元素。当试验流量处于100~400 mL/min时,根据《食品安全国家标准 饮用天然矿泉水》(GB 8537—2008)中对微量元素的限值(硒不低于

表6 各元素的溶出量与时间的关系式

Tab. 6 Relationships between Dissolution Amount of Each Element and Time

矿物元素	与时间对应的关系式
钠	$C = 21.31 \log_{10}(t+1)$
镁	$C = 1.67 \log_{10}(t+1)$
铝	$C = 0.07 \log_{10}(t+1)$
硅	$C = 17.08 \log_{10}(t+1)$
钾	$C = 0.92 \log_{10}(t+1)$
钙	$C = 137.83 \log_{10}(t+1)$
砷	$C = 0.085 \log_{10}(t+1)$
铬	$C = 0.0098 \log_{10}(t+1)$
锰	$C = 0.024 \log_{10}(t+1)$
铁	$C = 0.011 \log_{10}(t+1)$
硒	$C = 0.048 \log_{10}(t+1)$
锶	$C = 11.73 \log_{10}(t+1)$

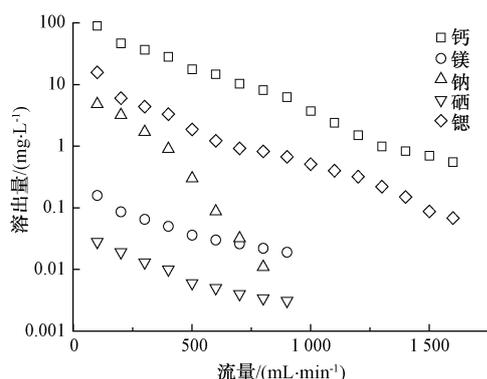


图4 材料元素溶出浓度与流量的关系

Fig. 4 Relationship between Material Element Dissolution and Flow Rate

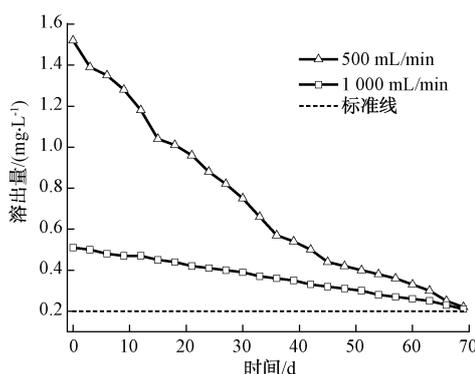


图5 材料元素锶在两组流量下的溶出稳定性

Fig. 5 Dissolution Stability of Material Element Strontium under Two Sets of Flow Rates

0.01 mg/L、锶不低于 0.2 mg/L), 矿化水中的微量元素硒和锶的溶出量能够同时达到天然矿泉水标准,且无其他指标超标的风险;当试验流量处于 400~1 300 mL/min 时,只有微量元素锶能够达到天然矿泉水标准;当试验流量高于 1 300 mL/min 时,微量元素锶的溶出量就会低于标准限值。由此可知,材料元素溶出的种类及浓度可通过调节流量控制。在试验流量范围内,矿化水的 pH 值在 7.3~8.1,呈弱碱性。

2.3.3 多孔陶瓷材料的溶出稳定性

微量元素锶的溶出量在 100~1 300 mL/min 流量下均能够达到天然矿泉水标准,因此,将锶元素作为重点研究目标。试验选取 1 000 mL/min 和 500 mL/min 高低两组流量值对材料开展溶出稳定性研究,材料在两组流量下锶溶出量随时间的变化如图 5 所示。锶的溶出量随时间均呈稳定下降的趋势,说明材料中元素锶的衰减较为稳定;锶溶出量在 500 mL/min 流量下的下降速率比在 1 000 mL/min 流量下的速率更大,这是因为流量越小,水与陶瓷材料的接触时间相对更长,锶的溶出量更多,材料中锶的损耗更大;陶瓷材料在两组流量下流动近 70 d 后,锶的溶出量开始低于 0.2 mg/L。由于流量不同,水处理量存在差异,经计算,材料在两组流量下分别可处理 50、100 m³ 水量。由此可知,从微量元素锶的溶出保持相对稳定和材料使用寿命的角度,建议材料的使用流量为 1 000 mL/min。其他元素的溶出稳定性与锶呈相似的规律。

2.3.4 多孔陶瓷材料的经济分析

多孔陶瓷材料及矿化水的成本由以下组成:原

料、设备、水耗与电耗、人工及运营维护成本,如表 7 所示。其中,多孔陶瓷材料的原料成本为 30~80 元/kg;18 根滤芯的水处理总量为 1 800~3 600 m³。

表 7 吨水成本的分解明细

Tab. 7 Details of Cost per m³ of Water

明细	成本/元	备注
矿石原料	540~1 440	根据陶瓷材料配方波动;共 18 根滤芯
设备	100 000	按使用 10 年计,每年折旧 10 000 元
水耗及电耗	7 920~15 840	纯水机的废水比按 1:1 计
人工	0	试验期间,由于只需简单操作,暂忽略不计
运营维护	0	
总成本	18 460~27 280	/
吨水成本	7.58~10.26	/

由上述明细成本,能够计算出生产成本为 7.58~10.26 元/m³,虽然该成本略高于长沙地区的生活饮用水的定价成本,但是相较于国内市售矿泉水的售价成本为 4 000~14 000 元/m³,该矿化水则具备显著优势。因此,多孔陶瓷材料及矿化水的制备成本在可控范围内,且相较于市售矿泉水具有明显的优势。

3 结论

(1) 研究通过正交法,考察了黏合剂和造孔剂的用量、烧结温度、恒温时间等因素对矿石材料瓷化的影响,得出制备多孔陶瓷材料的最佳工艺条件为:5%的碳酸氢铵造孔剂、无硅酸钠黏合剂、1 200 ℃的煅烧时间和 1 h 的恒温时间。在上述条件下,制得多孔材料的抗压强度为 1.68 MPa,气孔率为 6.57%。

(2)多孔陶瓷材料的溶出性能研究表明,材料在规定的 24 h 内无重金属超标风险,具有良好的溶出安全性;材料在流动状态下可以溶出钙、镁、钠、硒和锶 5 种元素,其中微量元素锶的溶出量可达到《食品安全国家标准 饮用天然矿泉水》(GB 8537—2008)要求,元素溶出种类及浓度可通过流量控制。

(3)材料在 500 mL/min 和 1 000 mL/min 两组流量下开展溶出稳定性研究,材料中微量元素锶能够稳定释放,最终折算出水的处理量分别为 50、100 m³。多孔陶瓷材料可以较大的流量范围内溶出微量元素锶,且溶出量达到了天然矿泉水的水平,在含锶矿泉水的制备上具有良好的应用前景。

参考文献

- [1] LAHAV O, BIRNHACK L. Quality criteria for desalinated water following post-treatment[J]. *Desalination*, 2007, 207(1/2/3): 286-303. DOI: 10.1016/j.desal.2006.05.022.
- [2] 唐娜,弓家谦,何国华,等.海水淡化水矿化工艺研究[J].*水处理技术*, 2014, 40(7): 29-35.
TANG N, GONG J Q, HE G H, et al. Research on mineralization of desalination water by dissolving ore [J]. *Technology of Water Treatment*, 2014, 40(7): 29-35.
- [3] QIU Z Q, TAN Y, ZENG H, et al. Multi-generational drinking of bottled low mineral water impairs bone quality in female rats [J]. *Plos One*, 2015, 10(3): e0121995. DOI: 10.1371/journal.pone.0121995.
- [4] ZENG H, SHU W, CHEN J, et al. Experimental comparison of the reproductive outcomes and early development of the offspring of rats given five common types of drinking water [J]. *Plos One*, 2014, 9(10): e108955. DOI: 10.1371/journal.pone.0108955.
- [5] LUO J H, ZHAO Q, ZHANG L, et al. The consumption of low-mineral bottled water increases the risk of cardiovascular disease: An experimental study of rabbits and young men [J]. *International J of Cardiology*, 2013, 168(4): 4454-4456.
- [6] 刘宏伟.海水淡化水矿化工艺研究[D].天津:天津大学, 2012.
LIU H W. Remineralization of desalinated seawater [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [7] 左世伟,解利昕,李凭力,等.海水淡化水矿化过程研究[J].*化学工业与工程*, 2010, 27(2): 163-166.
ZUO S W, XIE L X, LI P L, et al. Mineralization processes of desalinated water by limestone dissolution[J]. *Chemical Industry and Engineering*, 2010, 27(2): 163-166.
- [8] WITHERS A. Options for recarbonation, remineralisation and disinfection for desalination plants[J]. *Desalination*, 2005, 179(1/2/3): 11-24. DOI: 10.1016/j.desal.2004.11.051.
- [9] 杨洋,高学理,李玉,等.海水淡化水的后处理研究[J].*水处理技术*, 2014, 40(6): 62-65.
YANG Y, GAO X L, LI Y, et al. Study on the posttreatment of desalted seawater [J]. *Technology of Water Treatment Technology*, 2014, 40(6): 62-65.
- [10] LAHAV V O. Fundamental chemistry and engineering aspects of post-treatment processes for desalinated water—A review [J]. *Desalination*, 2011, 273(1): 6-22.
- [11] 赵葆,武桂芝,赵洪武,等.几种天然矿化材料对淡化海水的矿化效果[J].*净水技术*, 2019, 38(10): 124-130.
ZHAO B, WU G Z, ZHAO H W, et al. Effect of several natural mineralizing materials on desalinated seawater mineralization[J]. *Water Purification Technology*, 2019, 38(10): 124-130.
- [12] 李淑娜,陈志善,吴雅琴,等.盐酸溶解石灰石法的海水淡化再矿化中试研究[J].*水处理技术*, 2021, 47(3): 102-105.
LI S N, CHEN Z S, WU Y Q, et al. Remineralization of reverse osmosis (RO)-desalted water: A pilot study based on limestone dissolving with HCl [J]. *Technology of Water Treatment Technology*, 2021, 47(3): 102-105.
- [13] 李秀文.一种基于天然岩石材料的弱碱性复合滤芯及其制备方法:201910258842X[P]. 2019-04-01.
LI X W. A weakly alkaline composite filter element based on natural rock material and its preparation method: 201910258842X [P]. 2019-04-01.
- [14] 徐祥瀚,张宁,阚洪敏,等.高比表面多孔材料的制备研究进展[J].*粉末冶金工业*, 2016, 26(2): 68-74.
XU X H, ZHANG N, KAN H M, et al. Study on preparation of porous materials with high specific surface [J]. *Powder Metallurgy Industry*, 2016, 26(2): 68-74.
- [15] 何江锋,张海军,葛胜涛,等.SiC多孔陶瓷制备方法研究进展[J].*耐火材料*, 2020, 54(2): 163-171.
HE J F, ZHANG H J, GE S T, et al. Research progress in preparation methods of SiC porous ceramics [J]. *Refractories*, 2020, 54(2): 163-171.
- [16] 金培.论陶瓷窑炉烧成气氛的控制[J].*江苏陶瓷*, 2011(4): 11-12.
JIN P. Discussing on the control of ceramic kiln firing atmosphere [J]. *Jiangsu Ceramics*, 2011(4): 11-12.
- [17] 曾令可,胡动力,税安泽,等.多孔陶瓷制备新工艺及其进展[J].*中国陶瓷*, 2007, 43(4): 7-11.
ZENG L K, HU D L, SHUI A Z, et al. The novel technology and development of preparation of porous ceramics [J]. *Chinese Ceramics*, 2007, 43(4): 7-11.
- [18] 马调调.铜尾矿粉多孔陶瓷制备及其吸附性能研究[J].*陶瓷*, 2019(9): 24-32.
MA D D. Preparation and adsorption properties of porous ceramics from copper tailings[J]. *Ceramics*, 2019(9): 24-32.

(下转第 156 页)

- Water & Wastewater, 2016, 32(10): 15-21.
- [22] XU C Q, TANG T, JIA H F, et al. Benefits of coupled green and grey infrastructure systems: Evidence based on analytic hierarchy process and life cycle costing [J]. Resources, Conservation & Recycling, 2019, 151: 104478. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104478.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 住房和城乡建设部关于发布国家标准《城镇内涝防治技术规范》的公告 [EB/OL]. (2017-03-02) [2022-09-02]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgnr/tzgg/201703/20170302_231224.html. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Announcement of the Ministry of Housing and Urban Rural Development on issuing the *Technical Code for Urban Flooding Prevention And Control* [EB/OL]. (2017-03-02) [2022-09-02]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgnr/tzgg/201703/20170302_231224.html.
- [24] 上海市水务局. 上海市水务局转发《关于同意上海市中心城区雨水调蓄池选址专项规划的批复》[EB/OL]. (2022-02-22) [2022-09-02]. <http://swj.sh.gov.cn/swyw/20220301/e5301d14ca494728b1c92a7c3de23a29.html>. Shanghai Water Authority. Shanghai Water Authority forwards Reply on *Approving the Special Planning for the Site Selection of Rainwater Regulation and Storage Tank in Shanghai Central City* [EB/OL]. (2022-02-22) [2022-09-02]. <http://swj.sh.gov.cn/swyw/20220301/e5301d14ca494728b1c92a7c3de23a29.html>.
- [25] 王晓鹏. 苏州河深隧调蓄工程综合设施的集约化布置方案 [J]. 净水技术, 2019, 38(12): 41-45. WANG X P. Solutions of integrated layout for comprehensive facilities in deep tunnel storage project under Suzhou Creek [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(12): 41-45.
- [26] Mile High Flood District. Urban storm drainage criteria manual; Volume I management, hydrology, and hydraulics [EB/OL]. (2017-03-18) [2022-09-02]. <https://udfed.org/wp-content/uploads/uploads/vol1%20criteria%20manual/USDCM%20Volume%201.pdf>.
- [27] 王耀堂. 道路用于城市大排水系统规划设计方法与案例研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2017. WANG Y T. Planning-design methods and case study on major drainage system using urban roads [D]. Beijing University of civil engineering and architecture, 2017.
- [28] MUSTAFFA Z, AL-QADAMI E H H, SHAH S M H, et al. Impact and mitigation strategies for flash floods occurrence towards vehicle instabilities [J]. Flood Impact Mitigation and Resilience Enhancement. DOI: 10.5772/intechopen.92731.
- [29] 黄华兵, 王先伟, 柳林. 城市暴雨内涝综述: 特征、机理、数据与方法 [J]. 地理科学进展, 2021, 40(6): 1048-1059. HUANG H B, WANG X W, LIU L. A review on urban pluvial floods: Characteristics, mechanisms, data, and research methods. Progress in Geography, 2021, 40(6): 1048-1059.
- [30] 高学瓌, 陈奕, 蔡辉艺, 等. 城市道路雨水排放系统构建及要点研究 [J]. 给水排水, 2021, 47(6): 36-42. GAO X L, CHEN Y, CAI H Y, et al. Research on construction and key points of urban road rainwater drainage system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(6): 36-42.
- [31] 王晓明, 高学杰. 什么是千年一遇事件? ——论灾害事件的发生概率和重现期 [J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(5): 628-628. WANG X M, GAO X J. What is a once-in-a-thousand event? On the occurrence probability and recurrence period of disaster events [J]. Climate Chang Research, 2021, 17(5): 628-628.
- [32] 冷红, 陈天, 翟国方, 等. 极端气候背景下的思考: 城乡建设与治水 [J]. 南方建筑, 2021(6): 1-9. LENG H, CHEN T, ZHAI G F, et al. Urban-rural construction and water control against the background of extremen climates [J]. South Architecture, 2021(6): 1-9.

(上接第 142 页)

- [19] 杨辉, 马亮, 杨智荣, 等. 膨润土复合土壤调理材料圆盘造粒试验研究 [J]. 中国非金属矿工业导刊, 2019(4): 13-15. YANG H, MA L, YANG Z R, et al. Experimental study on disk granulation of bentonite compound soil conditioning material [J]. China Non-Metallic Minerals Industry, 2019(4): 13-15.
- [20] 钱军民, 催凯, 艾好, 等. 多孔陶瓷制备技术研究进展 [J]. 兵器材料科学与工程, 2005, 28(5): 60-64. QIAN J M, CUI K, AI H, et al. Progress in research of preparation technologies of porous ceramics [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2005, 28(5): 60-64.
- [21] 杨刚宾, 蔡序珩, 乔冠军, 等. 多孔陶瓷制备技术及其进展 [J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2004, 25(2): 99-103. YANG G B, CAI X H, QIAO G J, et al. Fabricating technologies and progress of porous ceramics [J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2004, 25(2): 99-103.
- [22] 崔静洁, 何文, 廖世军, 等. 多孔材料的孔结构表征及其分析 [J]. 材料导报, 2009, 23(13): 82-86. CUI J J, HE W, LIAO S J, et al. Measuring and analysing techniques of structural features for porous materials research [J]. Material Review, 2009, 23(13): 82-86.
- [23] 宋超. 多孔陶瓷的制备及特性研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2007. SONG C. Preparation and study on characteristics of porous ceramics [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2007.