

DOI: 10.13957/j.cnki.tcxh.2017.03.016

玄武岩纤维掺量对泡沫玻璃性能影响的研究

申鹏飞, 秦子鹏, 田艳, 李刚, 骆成彦
(石河子大学 水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832000)

摘要: 为了研究玄武岩纤维掺量对泡沫玻璃性能的影响, 以粉煤灰、玻璃粉、玄武岩纤维及外加剂制备泡沫玻璃, 分析不同掺量下玄武岩纤维对泡沫玻璃物理性能、力学性能和导热系数的影响。研究结果表明: 随着玄武岩纤维掺量的增加, 泡沫玻璃的表观密度、导热系数呈递增趋势, 当玄武岩纤维掺量为3%~4%时, 表观密度变化较为平缓; 当玄武岩纤维掺量为1%时, 导热系数达到0.0631 W/(m·K), 当玄武岩纤维掺量在1%~5%时, 对泡沫玻璃的含水率、吸水率影响较小, 分别维持在0.35%、15%左右; 当玄武岩纤维的掺量在1%~4%时, 泡沫玻璃的抗压、抗折强度逐渐增大, 掺量在4%时, 试样的抗压、抗折强度达到8.28 MPa和0.75 MPa, 相比于基准试样, 分别提高了2.24倍和1.92倍。

关键词: 玄武岩纤维; 泡沫玻璃; 力学性能; 导热系数

中图分类号: TQ174.75 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2278(2017)03-0366-06

Effects of Basalt Fiber Content on Foam Glass Properties

SHEN Pengfei, QIN Zipeng, TIAN Yan, LI Gang, LUO Chengyan

(College of Water Conservancy and Architecture Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, Xinjiang, China)

Abstract: In order to study the effect of basalt fiber content on the properties of fly ash foam glass, foam glass was prepared from the mixture of fly ash, glass powder, basalt fiber and additives. The corresponding influence of different basalt fiber content on fly ash foam glass's physical properties, mechanical properties as well as thermal conductivity were studied. The results show that with the increase of basalt fiber content, there is an increasing tendency in both the apparent density and the heat conductivity coefficient of fly ash foam glass; when the basalt fiber content is 3%~4%, the apparent density changes more gently; when the basalt fiber content is 1%, the thermal conductivity coefficient reaches 0.0631 W/(m·K); when the basalt fiber content is 1%~5%, its impact on the moisture content and the moisture absorption rate of fly ash foam glass is not obvious, with both of them maintained at about 0.35% and 15% respectively. When the basalt fiber content is 1%~4%, the compressive strength and the flexural strength of fly ash foam glass increase gradually. When the basalt fiber content is 4%, the compressive strength and the flexural strength are 8.28 MPa and 0.75 MPa respectively; compared with those of the benchmark specimen, they are increased by 2.24 and 1.92 times.

Key words: basalt fiber; foam glass; mechanical property; heat conductivity coefficient

0 引言

随着经济社会的发展和科学技术的进步, 我国加大了创建“资源节约型, 环境友好型”国家的力度, 节能型材料越来越受欢迎^[1]。在我国的能源消耗中, 建筑业能耗已经成为三大“能耗大户”之一^[2]。因此, 研制低能耗的新型建筑材料, 特别是低导热的保温隔热材料, 具有十分重要的意义。目前, 我国实施全面推进建筑节能, 使建筑保温材料成为建筑领域研究的热点。泡沫玻璃是一种内部有许多均

匀微小气孔连通或封闭的无机非金属质轻多孔的新型环保材料, 其具有容重低、强度高、导热系数小、不燃性、防虫蛀、耐酸耐碱能力强、无害、无毒、无放射、化学性质稳定、易加工且不易变型等特点, 得到许多人的认知和重视, 使其在外墙与屋面保温、石油化工、隔音吸声、污水过滤、绿化保水等领域得到广泛的应用^[3-7]。

粉煤灰泡沫玻璃是以粉煤灰和玻璃粉为主要原料, 加入一定量的发泡剂, 经过炉内高温处理, 混合体吸热熔化, 发泡剂发生氧化或分解反应产生气

收稿日期: 2016-08-22。

修订日期: 2016-10-23。

基金项目: 国家自然科学基金(51468056); 石河子大学第十五期大学生研究训练计划项目(SRP2017110)。

通信联系人: 秦子鹏(1985-), 男, 硕士, 讲师。

Received date: 2016-08-22.

Revised date: 2016-10-23

Correspondent author: Qin Zipeng(1985-), male, Master, Lecturer

E-mail: qzshzu@163.com

体，当泡内气体压力大于气泡表面张力时，形成一种内部充满数量多、体积小、分布均匀连通或封闭的气孔结构，再经降温后得到的新型环保节能的建筑功能材料^[8-13]。然而，由于粉煤灰泡沫玻璃内部气孔较多，且分布随机，加之玻璃粉烧结后脆性较大，故其性能往往存在一定的缺陷，主要表现为抗压抗折强度低、吸水率大和易开裂等方面^[14]。

玄武岩纤维具有耐高温、化学稳定性好、吸湿性低、抗酸碱能力强和与粉煤灰泡沫玻璃结合性好等特点。在泡沫玻璃制品中加入玄武岩纤维不仅可以在粉煤灰泡沫玻璃中起到增强、阻裂、提韧等作用^[15-16]；而且还可以利用其在粉煤灰泡沫玻璃中呈三维空间乱向分布得特点，改变粉煤灰泡沫玻璃内部孔结构，从而使其物理、力学性能得到提高。

本文主要通过单因素试验法对粉煤灰泡沫玻璃的性能进行测定，分析玄武岩纤维的掺量对粉煤灰泡沫玻璃的物理性能、力学性能、热工性能的影响。

1 实 验

1.1 实验原料

(1)粉煤灰：产自新疆石河子天富南热电厂，粉

煤灰化学组分测定按照GB/T 1574-2007中规定的成分分析方法，主要化学成分及物理指标见表1。

(2)玻璃粉：玻璃粉原料为石河子市某玻璃店收集的废弃平板玻璃，清水洗净后，烘干，放入滚筒球磨机中球磨2 h，过200目筛，筛余量4.70wt.%(孔径为0.074 mm)；废玻璃化学组分的测定利用X-射线荧光光谱仪，采用熔片法检测其成分，主要化学成分见表1。

(3)玄武岩纤维：成都某公司提供，其物理力学性能见表2。

(4)外加剂：碳酸钠(分析纯，Na₂CO₃含量为99.5%)，由天津市致远试剂有限公司生产；磷酸三钠(分析纯，Na₃PO₄·12H₂O含量在98.0%以上)，由天津市致远试剂有限公司生产；硼砂(分析纯，Na₂B₄O₇·10H₂O含量大于99.5%)由天津市致远试剂有限公司生产。

(5)脱模剂：氮化硼离型喷剂，型号：JD-3028AAA。

(6)水：普通自来水。

1.2 工艺流程

泡沫玻璃的制备工艺流程分为两种：一种是

表1 粉煤灰和玻璃的化学组分及物理指标

Tab.1 Chemical composition and physical indicators of fly ash and glass

Term	Chemical Composition /wt. %						Fineness /wt. %	Loss on ignition /%	Stability
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O+Na ₂ O			
Fly ash	59.84	30.77	3.30	1.84	2.35	1.90	4.70	4.92	Eligibility
Waste glass	72.33	1.40	0.15	8.62	4.72	12.78	—	—	—

表2 玄武岩纤维的物理性能

Tab.2 The physical properties of basalt fibers

Fiber type	fineness ratio	Tensile strength	Elastic Modulus	Density	Elongation at break	Diameter
		/MPa	/MPa	/(g·cm ⁻³)	/%	/mm
Basalt fiber	12	4000	115000	2.65	≤3	1

表3 粉煤灰泡沫玻璃的配合比

Tab.3 The mixture ratio of fly ash foam glass

No.	Fly ash /%	Glass powder /%	Fiber content /‰	Sodium carbonate /%	Sodium phosphate tribasic /%	Sodium tetraborate /%
a	25	75	0.0	2	2	2
b	25	75	1.5	2	2	2
c	25	75	3.0	2	2	2
d	25	75	4.5	2	2	2
e	25	75	6.0	2	2	2
f	25	75	7.5	2	2	2

备注：a为基准试样，b~f为掺纤维的试验组

“一步法”；另一种是“两步法”，即先将泡沫玻璃混合料进行烘干处理，其次拆掉模具，再次将脱模后的坯体放入高温炉中进行烧制。本实验采用“两步法”，试验所用粉煤灰泡沫玻璃配合比见表3。

1.3 试件的制备

将粉煤灰、玻璃粉、玄武岩纤维以及其他外加剂按试验方案中的比例称取，首先把粉煤灰、玻璃粉和玄武岩纤维放入搅拌机中，搅拌3~5 min；再将外加剂粉末倒入混合的粉体中，搅拌5 min；最后，倒入基料总质量(粉煤灰和玻璃粉)35%水，搅拌3~4 min，装入预先涂有氮化硼的钢模具中，放在混凝土振动台上振动至混合体中没有气泡溢出为止，然后放入电热鼓风干燥箱，以80 ℃烘干，即得到粉煤灰泡沫玻璃坯体。为使粉煤灰泡沫玻璃在烧制过程中受热均匀，需在高温电阻炉底部铺设20 mm左右的石英砂。高温电阻炉的烧制程序分为四个阶段，如图1所示。

预热阶段：从室温以5 ℃/min升温至400 ℃，并在400 ℃保温30 min，以去除坯体中的游离水、吸附水、结合水等；发泡阶段：以10 ℃/min的升温速率将坯体加热到860 ℃，并在此温度保温25 min，以使产生的气体被熔融的玻璃液包裹而不

外溢，形成较为均匀的气泡结构；稳泡与退火阶段：以15 ℃/min的速率降温至600 ℃，并在此温度保温30 min，以使形成的气泡结构迅速稳定下来，避免坯体在最后的阶段气体外溢造成下陷，随后关闭电源，待电阻炉内降至室温后，取出泡沫玻璃样品。制得泡沫玻璃试样如图2所示。

1.4 粉煤灰泡沫玻璃的性能测试

(1)吸水率与含水率，采用尺寸为40 mm × 40 mm × 40 mm的试件，依照GBT 5486-2008《无机硬质绝热制品试验方法》、JC/T 647-2014《泡沫玻璃绝热制品》及GB/T10297-1998《非金属固体材料导热系数的测定》进行测定。

(2)抗折强度采用40 mm × 40 mm × 160 mm的试件，用无锡建仪仪器机械有限公司生产的DKZ-5000型电动抗折试验机进行抗折强度的测定；抗压强度用无锡市锡仪建材仪器厂生产的40 mm × 40 mm水泥抗压夹具，在万能试验机上进行抗压强度测试。

(3)导热系数采用北京世纪建通环境技术有限公司研制的单试样双热流计式JTRG-III型热流计式导热仪测试。

2 结果与讨论

2.1 玄武岩纤维对表观密度的影响

粉煤灰泡沫玻璃的表观密度间接地反映了泡沫玻璃试样密实程度，而越密实的试样其导热系数相对较大。因此，粉煤灰泡沫玻璃的表观密度的大小对衡量其保温性能具有重要作用。由图3可以看出，加入玄武岩纤维后，粉煤灰泡沫玻璃的表观密度与基准试样相比，有所增大，呈递增的趋势。说明玄武岩纤维的掺量对其表观密度的影响较大，这可能是因为玄武岩纤维在复合材料内部形成了三维网状结构，在高温烧结过程中对孔结构的膨胀产生了阻碍作用；随着玄武岩纤维掺量的增加，粉煤灰泡沫玻璃的表观密度逐渐增加。而当玄武岩纤维

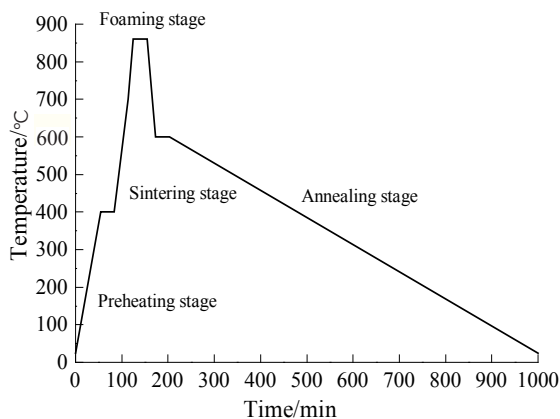


图1 电阻炉烧制程序

Fig. 1 The sintering schedule of the resistance furnace

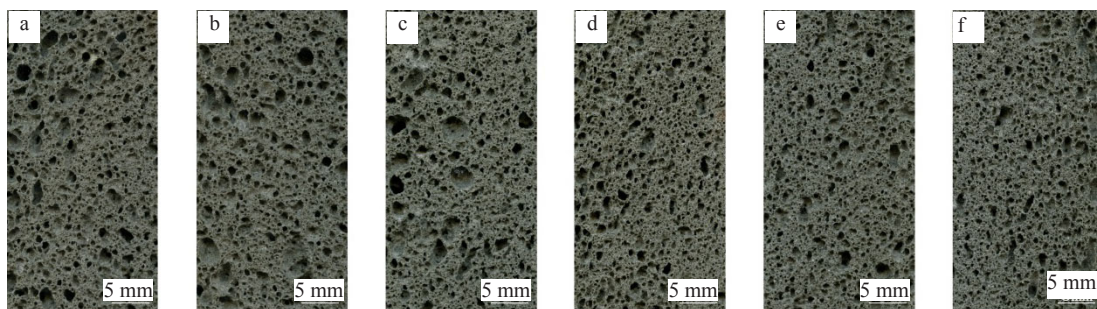


图2 不同掺量纤维下的试样

Fig. 2 The samples prepared with different fiber content

掺量在3‰-4‰时,其表观密度的增加并不明显,这说明一定掺量的玄武岩纤维会使泡沫玻璃的孔结构发生改变,对泡沫玻璃的发泡产生影响。

2.2 玄武岩纤维对吸水率、含水率的影响

粉煤灰泡沫玻璃的含水率、吸水率对其导热系数的影响较大。粉煤灰泡沫玻璃的吸水主要包括毛细孔渗透和连通孔渗透两种形式。毛细孔是在粉煤灰泡沫玻璃高温煅烧过程中形成的孔,而连通孔是由于大气泡吞并小气泡相互连接形成的。从试验所得试样的断面可以看出,粉煤灰泡沫玻璃内部孔结构分布均匀,大孔和连通孔相对较少,说明试验所得试样的吸水主要是通过毛细孔的渗透来实现的。由图4可以看出,加入玄武岩纤维后,粉煤灰泡沫玻璃的含水率与空白样相比,基本保持不变,维持在0.35%左右,说明玄武岩纤维对粉煤灰泡沫玻璃的含水率影响不大。而粉煤灰泡沫玻璃的吸水率与基准试样相比,其都在15%处上下浮动,这是由于材料本身具有的离散性造成的。由以上分析可知,

玄武岩纤维对粉煤灰泡沫玻璃的含水率、吸水率影响较小。

2.3 玄武岩纤维对力学性能的影响

粉煤灰泡沫玻璃的强度主要来源于玻璃粉与粉煤灰经高温烧结所形成的复合材料。当粉煤灰泡沫玻璃的内部孔分布越均匀、孔径越小、孔形态越好时,其强度越高。由图5、图6可以看出,加入玄武岩纤维后,粉煤灰泡沫玻璃的抗压、抗折强度与空白样相比均有所提高。随着玄武岩纤维掺量增加,其抗压、抗折强度呈现先增大后减小的趋势。当玄武岩纤维掺量在2‰-3‰时,其抗压强度提高十分明显,相比基准试样,提高了50%左右。而当玄武岩纤维掺量在3‰-4‰时,其抗折强度提高最为显著。这是由于玄武岩纤维掺量的加入,在复合材料内部形成了三维网络结构,从而改善了其抗压强度,并且在一定掺量范围内,随着掺量的增加,这种改善效果越明显。当玄武岩纤维掺量在4‰-5‰时,其抗压强度急剧降低,但相

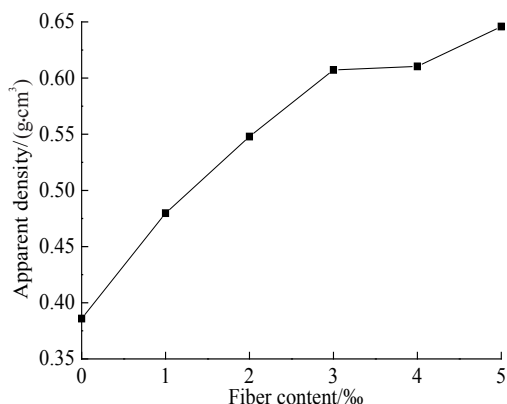


图3 纤维掺量对表观密度的影响

Fig. 3 The influence of fiber content on the apparent density

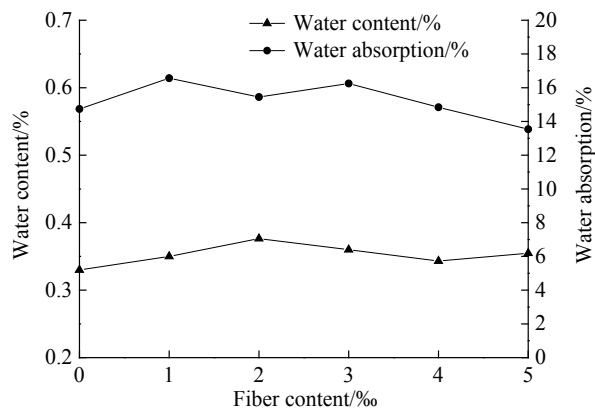


图4 纤维掺量对含水率、吸水率的影响

Fig. 4 The influence of the fiber content on the moisture content and the moisture absorption rate

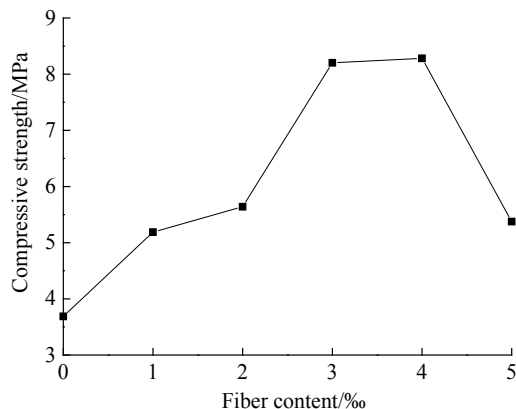


图5 纤维掺量对抗压强度的影响

Fig. 5 The influence of the fiber content on the compressive strength

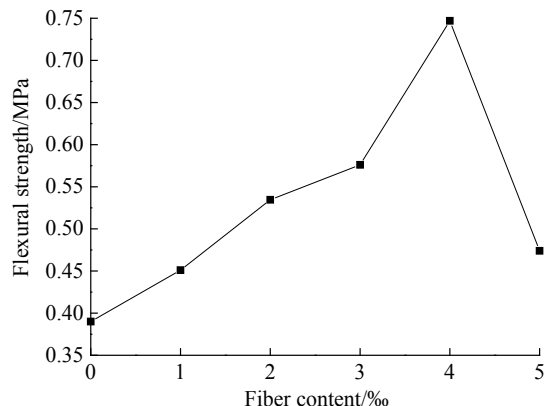


图6 纤维掺量对抗折强度的影响

Fig. 6 The influence of the fiber content on the flexural strength

比与基准试样,抗压强度依然有所提高。这说明玄武岩纤维的三维网络分布对复合材料起到了支撑作用,但是玄武岩纤维掺量过多,容易导致纤维在复合材料内部分散性降低,破坏粉煤灰泡沫玻璃的内部结构,致使抗压强度下降。当玄武岩纤维的掺量为4‰时,其抗压、抗折强度达到最大,分别为8.28 MPa、0.75 MPa,提高了2.24和1.92倍。

2.4 玄武岩纤维对导热系数的影响

导热系数的大小是衡量保温隔热材料性能的重要指标。粉煤灰泡沫玻璃的导热系数之所以较低,是因为多而封闭的孔洞所包含的气相起到了增大热阻的作用。因此,粉煤灰泡沫玻璃的孔隙率和孔的形态对其导热系数有重要的影响。由图7可知,加入玄武岩纤维后,粉煤灰泡沫玻璃的导热系数比空白样的导热系数大。随着玄武岩纤维掺量的增加,导热系数呈现逐渐变大的趋势,其变化范围始终在0.061–0.069 W/(m·K)之间。可见玄武岩纤维的加入可使粉煤灰泡沫玻璃热阻减小,但其掺量对导热系数的影响并不十分显著。当玄武岩纤维掺量为1‰时,粉煤灰泡沫玻璃导热系数较小,保温效果相对较好。

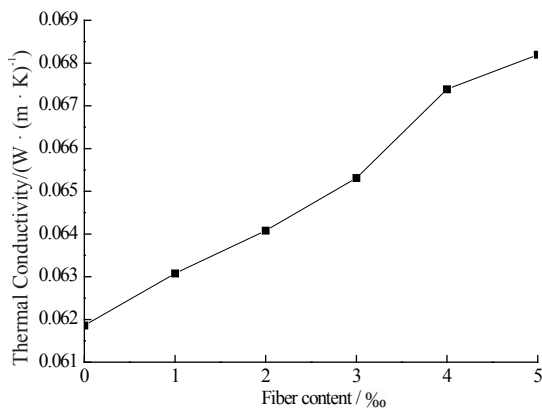


图7 纤维掺量对导热系数的影响

Fig. 7 The influence of the fiber content on the heat conductivity coefficient

3 结论

(1)粉煤灰泡沫玻璃的表观密度会随着玄武岩纤维掺量的增加而呈增大趋势,而当玄武岩纤维掺量在3‰–4‰时,其表观密度的增加并不明显。但玄武岩纤维对粉煤灰泡沫玻璃的含水率、吸水率影响较小。

(2)随着玄武岩纤维掺量的增加,泡沫玻璃的表观密度和导热系数呈逐渐增大趋势。由此可见,玄

武岩纤维掺量不能太高,进而不利于泡沫玻璃的减重和保温。

(3)玄武岩纤维对泡沫玻璃的力学性能的改善较为明显。当玄武岩纤维掺量为4‰时,泡沫玻璃的力学性能提高最为显著,抗压强度可达8.28 MPa,提高了2.24倍;抗折强度达到0.75 MPa,提高了1.92倍。

参考文献:

- [1]刘阳,许峰,朱旭.粉煤灰泡沫玻璃的试验研究[J].中国陶瓷,2012,48(9):53–55.
LIU Y, XU F, ZHU X. China Ceramics, 2012, 48(9): 53–55.
- [2]郑明明,陈硕.建筑能耗监测平台的研究[J].建筑节能,2009,37(9):65–67.
ZHENG M M, CHEN S. Building Energy Efficiency, 2009, 37(9): 65–67.
- [3]李刚,李恒山,马玉薇,等.膨胀珍珠岩泡沫玻璃制备及性能研究[J].非金属矿,2015,38(1):45–47.
LI G, LI H S, MA Y W, et al. Non-Metallic Mines, 2015, 38(1): 45–47.
- [4]秦子鹏,马玉薇,李刚,等.基于正交试验分析影响泡沫玻璃性能的主要因素[J].非金属矿,2016,39(3):7–10.
QIN Z P, MA Y W, LI G, et al. Non-Metallic Mines, 2016, 39(3): 7–10.
- [5]LOTOV V A. Making foam glass based on natural and technogenic aluminosilicates [J]. Glass and Ceramics, 2012, 689.
- [6]SAMOILENKO V V, UGLOVA T K, TATARINTSEVA O S. Effect of the dispersity of glass batch on the structure and properties of foam glass [J]. Glass and Ceramics, 2014, 715–6.
- [7]蒋晓曙,朱凯华,陆雷,等.烧结法制备粉煤灰微晶泡沫玻璃[J].陶瓷学报,2012,32(3):324–329.
JIANG X S, ZHU K H, LU L, et al. Journal of Ceramics, 2012, 32(3): 324–329.
- [8]钱帅,林健,唐保山.用熔融法固化生活垃圾焚烧灰渣并制备泡沫玻璃[J].硅酸盐学报,2014,42(1):108–112.
QIAN S, LIN J, TANG B S. Journal of the Chinese Ceramic, 2014, 42(1): 108–112.
- [9]张源源,王志强,刘宝龙.以粉煤灰和碎玻璃为主要原料研制泡沫玻璃[J].大连工业大学学报,2014,33(2):127–130.
ZHANG Y Y, WANG Z Q, LIU B L. Journal of Dalian Institute of Light Industry, 2014, 33(2): 127–130.
- [10]王永亮,何忠茂,乔宏霞,等.泡沫玻璃外墙外保温体系的性能研究[J].新型建筑材料,2011,38(7):86–88.
WANG Y L, HE Z M, QIAO H X, et al. New Building Materials, 2011, 38(7): 86–88.
- [11]黄健,梁艳珍,张小珍,等.烧成温度对稀土尾砂堇青石多孔

- 陶瓷显微结构与性能的影响[J]. 陶瓷学报, 2014, 35(6): 593-597.
- HUANG J, LIANG Y Z, ZHANG X Z, et al. Journal of Ceramics, 2014, 35(6): 593-597.
- [12] 连汇汇, 苑文仪, 吴晓阳, 等. 利用废CRT屏玻璃为原料制备泡沫玻璃[J]. 环境工程学报, 2012, 6(1): 292-296.
- LIAN H H, YUAN W Y, WU X Y, et al. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(1): 292-296.
- [13] 孙进兴, 刘培生. 多孔吸声陶瓷的研究进展[J]. 陶瓷学报, 2015, 36(4): 347-352.
- SUN J X, LIU P S. Journal of Ceramics, 2015, 36(4): 347-352.
- [14] 古先文, 赵彦钊, 高乐文, 等. 原料湿磨时间对硅酸盐泡沫玻璃结构与性能的影响[J]. 中国陶瓷, 2012, 48(10): 21-24.
- GU X W, ZHAO Y Z, GAO L W, et al. China Ceramics, 2012, 48(10): 21-24.
- [15] 邵宁宁, 刘泽, 王小双, 等. PET纤维增韧的粉煤灰泡沫地质聚合物热性能分析[J]. 人工晶体学报, 2015, 44(9): 2606-2613.
- SHAO L L, LIU Z, WANG X S, et al. Journal of Synthetic Crystals, 2015, 44(9): 2606-2613.
- [16] 高磊, 胡国辉, 杨晨, 等. 玄武岩纤维加筋黏土的剪切强度特性[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(S1): 231-237.
- GAO L, HU G H, YANG C, et al. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(S1): 231-237.