

含水率及温度对钢渣泡沫混凝土导热系数的影响

张雪,胡敏,陈德鹏

(安徽工业大学建筑工程学院,安徽马鞍山 243002)

摘要:为充分利用固废资源,探究钢渣应用于无机保温建材领域的潜在价值,用等量钢渣替代水泥制备钢渣泡沫混凝土,采用重湿度法考察含水率对其导热系数的影响;通过改变导热系数测定仪热板温度研究温度和其导热系数的关系;通过施加周期性的温-湿度模拟自然环境的变化,研究在自然环境下钢渣泡沫混凝土导热系数的变化规律。结果表明:钢渣泡沫混凝土的导热系数随含水率的增加而增加,但是增加趋势越来越小;随温度的升高而升高,且二者之有良好的线性关系;随周期性温-湿度循环次数的增加,导热系数越来越大,但增加的趋势越来越小。

关键词:钢渣;泡沫混凝土;含水率;温度;导热系数

中图分类号:TU 528.2 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1671-7872.2018.02.002

Effect of Water Content and Temperature on Thermal Conductivity of Steel Slag Foamed Concrete

ZHANG Xue, HU Min, CHEN Depeng

(School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China)

Abstract: To make full use of solid waste resources and explore the potential value of steel slag used in the field of inorganic insulation building materials, steel slag foamed concrete was prepared by using equal amount of steel slag instead of cement, then the effect of water content on its thermal conductivity was investigated by the method of heavy humidity; and the relationship between the temperature and its thermal conductivity was studied by changing the temperature of the hot plate of the thermal conductivity tester; finally the change rule of thermal conductivity of steel slag foamed concrete in natural environment was also studied by applying periodic temperature and humidity to simulate the actual environment. The results show that the thermal conductivity of steel slag foamed concrete increases with the increase of water content, but the increasing tended to be lower and lower; The thermal conductivity of steel slag foamed concrete increases with the increase of temperature, and there is a good linear-relationship between them; The thermal conductivity of steel slag foamed concrete is increasing with the cycle of periodic temperature and humidity, and the increasing tends to be lower and lower too.

Key words: steel slag; foamed concrete; water content; temperature; thermal conductivity

随着建筑市场的日益发展,建筑材料与能源问题日渐突出,节约能源已经成为可持续发展战略的一个重要方面。而钢渣、粉煤灰等工业废弃料作为一种废弃资源,已经越来越多地被用于建筑等行业,成为一种重要的材料。将陶粒^[1]、煤矸石^[2-3]、粉煤灰^[4-6]、钢渣^[7]等工业排放物加入泡沫混凝土原料中,不仅降低了泡沫混凝土的成本,还可节约资源保护环境,同时改善泡沫混凝土的一些性质。

收稿日期:2018-01-12

基金项目:安徽高校自然科学研究重大项目(KJ2016SD08);安徽省高校优秀青年人才支持计划重点项目(gxyqZD2016073);安徽工业大学研究生创新研究基金项目(2016086);国家级大学生创新训练计划项目(201610360028)

作者简介:张雪(1991—),女,安徽六安人,硕士生,研究方向为建筑材料。

通信作者:陈德鹏(1978—),男,河南唐河人,教授,研究方向为建筑材料。

目前,GB/T 10294—2008《绝热材料稳态热阻及有关特性的测定防护热板法》中有关于保温材料导热系数的测量和计算方法中没有考虑含水率的影响,规定条件均为绝干状态下对其导热系数进行测定,而且给定的导热系数皆为特定温度下的导热系数。而实际工程中泡沫混凝土等绝大多数保温材料属于多孔性材料,皆具有多孔结构,有较强的吸水性,在环境湿度较大时易吸潮,严重影响其热工性能^[8],不同环境下温度也有所不同,而且墙体结构的保温性能在自然环境下是逐渐衰减的。试验在本课题组已有的基础上,将分别对不同湿度和温度下的钢渣泡沫混凝土的导热系数进行研究,以探究含水率和温度对材料及墙体热工参数的影响;并通过施加周期性的温-湿度模拟自然环境的变化,研究在自然环境下钢渣泡沫混凝土的变化规律,为钢渣泡沫混凝土在实际工程中的应用提供依据。

1 试验

1.1 试验材料

采用P.O 42.5级普通硅酸盐水泥,该标号水泥表观密度为3 100 kg/m³,凝结硬化快,耐久性好且价格低廉,其主要成分及性能指标见表1,2。

表1 水泥主要成分, w/%

Tab. 1 Main components of cement, w/%

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	烧失量
57.21	23.54	6.12	4.57	2.51	0.61	2.31	0.85	0.23	1.57

表2 水泥性能指标

Tab. 2 Performance index of cement

标号	比表面积/(m ² /kg)	初凝时间/min	终凝时间/min	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
				3 d	28 d	3 d	28 d
P.O42.5	357	203	250	27.4	55.6	5.9	8.7

试验用钢渣为某公司提供,钢渣陈伏时间为5 a,成分多以氧化物形式出现,具体见表3,其表观密度为3 400 kg/m³,堆积密度为1 670 kg/m³。

表3 钢渣粉末的化学成分, w/%

Tab. 3 Chemical composition of steel slag powder, w/%

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	SO ₃	MnO	P ₂ O ₅	V ₂ O ₅
54.781	11.884	1.53	19.4	4.01	1.63	0.21	2.12	2.89	1.09

1.2 试验仪器

1.2.1 导热系数测定仪

采用沈阳紫微机电设备有限公司所产的CD-DR3030导热系数测定仪,其工作原理:在稳态条件下,在处于热板装置中心计量区域内的试件中建立一维恒定热流;当物体内部存在温度梯度时,热传导过程就会发生,热量从高温处向低温处传递。傅里叶导热定律在一维稳态传热时热量与材料导热系数的比例关系可知^[9-10]:假设热量传递方向沿着z轴,在垂直z轴的方向上取面元ds, dt时间内通过ds传递的热量dQ值为

$$dQ = -\lambda \left(\frac{d\theta}{ds} \right) ds dt \quad (1)$$

通过积分计算可得

$$\lambda = \frac{Qd}{2A\Delta\theta} \quad (2)$$

其中:Q为单位时间通过截面的热量;Δθ为冷板和热板温度差,Δθ=θ₁-θ₂;θ₁为中心热板面上温度均值;θ₂为左右冷板面上温度均值;λ为材料的导热系数;d为试件厚度;A为试件有效受热面积。

测定结构见图1,试件导热系数λ=Qd/(2A(θ₁-θ₂));平均导热系数λ=(λ_左+λ_右)/2,设备修正系数取1。

1.2.2 高低温交变湿热试验箱

采用无锡索亚特试验设备有限公司制造的CDJS系列高低温交变湿热试验箱,其可以模拟周期性温湿度变化环境,主要性能指标见表4。

1.3 试件的制备

钢渣泡沫混凝土配合比^[11]见表5。钢渣泡沫混凝土的制备工艺流程见图2。采用手动搅拌的方法制备泡沫,将称量好的发泡剂和水混合,先慢速搅动约1 min,使固体发泡剂完全溶解,然后快速搅动,溶液产生大量的泡沫。相对于机器而言,手动便于控制力度,更容易防止搅拌过度导致泡沫炸裂,搅拌时间为5 min,搅拌的泡沫细小均匀为最佳,泡沫在加入浆体前需静置2 min,使体积较大的泡沫先炸裂,从而降低泡沫混凝土在凝结硬化过程中的收缩程度;然后,先将钢渣、水泥和外加剂等集料按配合比混合均匀,接着加入水搅拌成均匀的浆体,搅拌时间为8 min;接着,将制备好的泡沫加入浆体中,继续搅拌至混合浆体表面没有明显的气泡破灭并且均匀为止,搅拌时间在3 min左右为宜,若搅拌时间过长,则容易导致泡沫炸裂;最后,将混合浆体浇注入模具。经多次试验研究发现,分3次注入,每次间隔3 min可以有效改善钢渣沉底。用工具将表面刮平且用塑料薄膜覆盖防止水分蒸发过快导致坍塌,在覆膜的时候用工具将其支撑,避免薄膜接触水泥表面,只要薄膜能防止水分蒸发即可;1~2 d后脱模放入标准养护室中养护至龄期。

2 试验结果与分析

2.1 含水率对钢渣泡沫混凝土导热系数的影响

采用重湿度法^[12-13]对试件的含水率进行控制,即对试件表面分别均匀喷洒相应质量分数的水(分别取2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12%, 14%, 18%, 20%, 22%, 24%, 26%),然后用湿毛巾覆盖,并养护6 h。放入导热系数测定仪前,用吸水性好的干毛巾对试件表面进行擦拭,防止有流动水干扰试验。并将养护好的钢渣泡沫混凝土板的两面都裹上一层塑料膜,以求在最大程度上减少试验过程中试件内的水分的流失,此外为防止温度过高将水分蒸发,将冷板温度设为15℃,热板温度设为35℃。钢渣泡沫混凝土导热系数在不同含水率下的测量结果见表6。

钢渣泡沫混凝土板均已静置6 h左右,且表面潮湿但是没有水分渗出;尽管已经覆膜处理,但是接触热板的那一面温度较高,仍有水分蒸发,但是蒸发量较小,且由于薄膜的存在,可以认为在薄膜内部的水分总量不变,为了减小水分蒸发带来的影响,试验所测量的含水率为试验结束时钢渣泡沫混凝土板的含水率。

由表6可知:钢渣泡沫混凝土的导热系数随着含水率的增加而增加,增加趋势逐渐减小,其主要原因在于热量传递主要有3种方式:热传导、热对流和热辐射,在本试验钢渣泡沫混凝土中热量传递的主要方式是热传导,其他2种方式传递的热量可以忽略不计。而钢渣泡沫混凝土内部热传导途径主要有3种,分别是

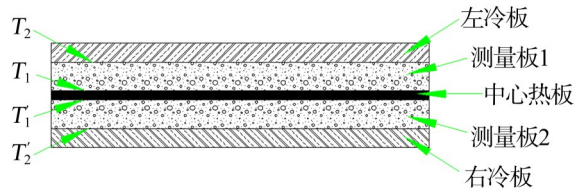


图1 导热系数测定结构原理

Fig. 1 Structure principle of thermal conductivity measurement

表4 CDJS系列高低温交变湿热试验箱

Tab. 4 CDJS series high and low temperature alternating humid heat test box

工作室尺寸 (宽×高×深)	1 500 mm×1 000 mm×1 000 mm
温度范围	-40~150℃
温度波动度	≤±0.3℃
温度均匀度	±1℃
升温速率	2~5℃/min(-40~100℃约需60 min)
降温速率	2~3℃/min(80~40℃约需45 min)
相对湿度范围	30%~98%, ±2.5%
相对湿度均匀度	+2(-3)%

表5 钢渣泡沫混凝土配合比, w/%

Tab. 5 Mix ratio of steel slag foamed concrete, w/%

水泥	减水剂	速凝剂	早强剂
93.4	1.4	3.8	1.4
钢渣 (占水泥比例)	发泡剂 (占水泥比例)	水料质量比	
10	0.07	50	

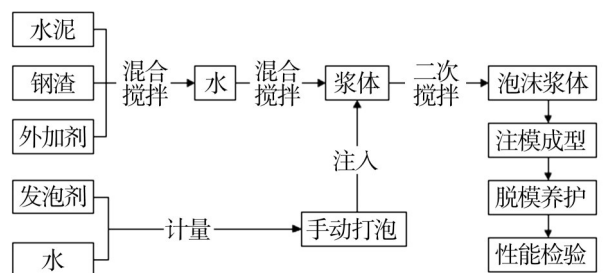


图2 钢渣泡沫混凝土的制备流程

Fig. 2 Preparation process of steel slag foamed con

表6 钢渣泡沫混凝土导热系数和含水率

Tab. 6 Thermal conductivity and moisture content of steel slag foamed concrete

试件1		试件2		平均	平均
含水率/%	导热系数/ (W/(m·K))	含水率/%	导热系数/ (W/(m·K))	含水率/%	导热系数/ (W/(m·K))
0	0.210 4	0	0.211 4	0	0.210 9
0.900	0.219 1	0.862	0.218 4	0.881	0.218 8
1.646	0.228 7	1.624	0.226 4	1.635	0.227 6
2.989	0.243 7	2.975	0.243 1	2.982	0.243 4
3.373	0.258 6	3.323	0.253 2	3.348	0.255 9
5.221	0.274 8	5.212	0.273 4	5.217	0.274 1
6.585	0.282 5	6.305	0.278 7	6.445	0.280 6
7.796	0.300 5	7.292	0.299 0	7.544	0.299 8
10.892	0.308 9	10.495	0.307 3	10.694	0.308 1
12.004	0.316 1	11.448	0.309 2	11.726	0.312 7
14.312	0.326 9	13.806	0.322 9	14.059	0.324 9
16.854	0.329 8	16.717	0.329 5	16.786	0.329 7
18.242	0.330 6	18.014	0.330 3	18.128	0.330 5

固体和固体导热传递、固体和气体导热传递、固体和液体导热传递,由文献[14]可知,水的导热系数约为0.599 W/(m·K),水泥的导热系数约为1.063 W/(m·K),而空气导热系数约为0.020 W/(m·K),其远小于其他介质的导热系数。当钢渣泡沫混凝土内部连通孔不含水或者含水量较少时,热量主要通过钢渣和水泥石之间的固固传递,其他2种方式传递的热量可以忽略不计;随着含水量的增加,钢渣泡沫混凝土内部的连通孔逐渐充满水,而水的导热系数远大于空气的导热系数,热量的主体要传递途径变为固固传递、固液传递、液液传递,所以钢渣泡沫混凝土的导热系数随着含水率的上升而增加。然而钢渣泡沫混凝土内部的开口孔的数量是一定的,当所有的连通孔均充满水时,导热系数达到极限,所以导热系数不会一直增长下去。

图3为钢渣泡沫混凝土导热系数和含水率关系的曲线。由图3可知,钢渣泡沫混凝土板的导热系数随含水率的增加并不是沿直线增加,曲线的斜率越来越小,二者之间具有良好的非线性关系,经过origin8.0拟合得到式(3)。

$$\lambda = 0.11654 + 0.07135 \ln(w + 3.52398), R^2 = 0.98365 \quad (3)$$

式中: λ 为钢渣泡沫混凝土的导热系数,W/(m·K); w 为钢渣泡沫混凝土试件的含水率,%; R^2 为相关系数。

2.2 温度对钢渣泡沫混凝土导热系数的影响

导热系数是指在稳定传热情况下,对于1 m厚的导热材料,当其两侧表面的温差为1℃时,在1 s内的时间内,通过1 m²面积时传递的热量。显而易见,当两侧表面的温度越高,则材料的导热系数也越高。试验分别设置7个温度,温度梯度均为20℃,对钢渣泡沫混凝土导热系数和温度之间的关系进行研究,测得数据如表7。

钢渣泡沫混凝土平均导热系数和温度的关系曲线如图4。由图4可知,钢渣泡沫混凝土板的导热系数随温度的增加近似沿直线增加,二者之间具有良好的线性关系,拟合结果见式(4)。

$$\lambda = 0.18308 + 6.67857 \times 10^{-4}t, R^2 = 0.9803 \quad (4)$$

式中: t 为热板温度,℃。

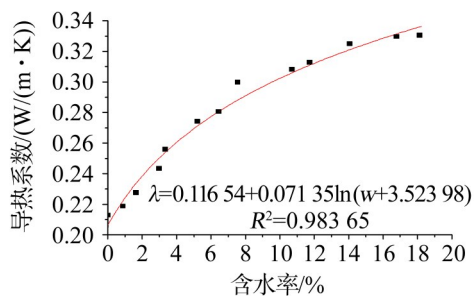


图3 钢渣泡沫混凝土导热系数和含水率的关系

Fig. 3 Relationship between thermal conductivity and conductivity water content of steel slag foam concrete

表7 钢渣泡沫混凝土导热系数和温度
Tab. 7 Thermal conductivity and temperature of steel slag foamed concrete

热板温度/℃	导热系数/(W/(m·K))								平均
	1		2		3		4		
	左板	右板	左板	右板	左板	右板	左板	右板	
30	0.203 1	0.201 1	0.202 0	0.195 5	0.195 1	0.206 2	0.206 3	0.209 1	0.209 3
35	0.207 7	0.208 4	0.209 4	0.197 5	0.197 1	0.210 4	0.210 5	0.214 1	0.214 5
40	0.209 0	0.210 2	0.210 9	0.198 6	0.198 2	0.211 6	0.211 8	0.215 2	0.215 5
45	0.211 9	0.212 8	0.214 7	0.200 9	0.200 8	0.213 7	0.213 7	0.219 2	0.219 0
50	0.216 2	0.218 3	0.220 1	0.204 6	0.204 5	0.216 2	0.216 5	0.224 6	0.224 8
55	0.221 0	0.224 1	0.224 9	0.207 6	0.207 1	0.220 1	0.220 6	0.231 8	0.231 5
60	0.223 0	0.226 1	0.226 5	0.209 5	0.209 1	0.222 3	0.222 5	0.234 0	0.233 6

当热量在钢渣泡沫混凝土内部传导时,固体依靠分子或原子等微观粒子的振动进行传递,而对于气体来说,热量通过气体分子不规则运动时的相互碰撞将热量从温度高的地方传到温度低的地方;根据传热机理,当环境温度升高,钢渣泡沫混凝土内部孔隙中的气体分子的不规则运动加剧,不同能量水平的气体分子相互碰撞几率变大,而固相原子或分子振动越发剧烈,材料单位面积内产生的热量增多,从而热传导变快,所以温度越高,材料的导热系数越高。

2.3 周期性温-湿度循环对钢渣泡沫混凝土导热系数的影响

通过中国气象网调取南京地区近累年平均每月最高温度和最低温度以及每月平均相对湿度对钢渣泡沫混凝土的保温性能进行研究,每个温-湿度段运行1 h,共24段为一个循环,每段之间的等待时间不计入循环总时间。将钢渣泡沫混凝土板放入湿热交替试验箱,如图5所示,待一个循环结束后将其拿出,对其导热系数进行测定(热板温度为35℃,冷板为15℃),测得数据见表8。

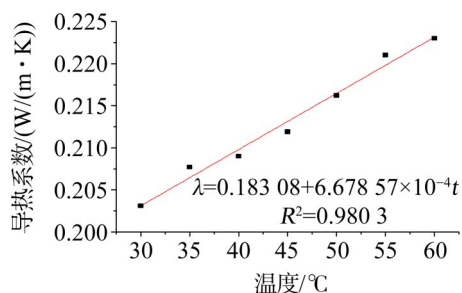


图4 钢渣泡沫混凝土导热系数和温度的关系

Fig. 4 Relationship between thermal and temperature of steel slag foam concrete



图5 周期性温-湿度循环试验

Fig. 5 Periodic temperature-humidity cycle test

表8 钢渣泡沫混凝土导热系数和循环次数

Tab. 8 Thermal conductivity and cycle times of steel slag foamed concrete

循环次数	导热系数/(W/(m·K))			循环次数	导热系数/(W/(m·K))		
	左板	右板	平均		左板	右板	平均
0	0.210 6	0.211 1	0.210 9	7	0.224	0.224 7	0.224 4
1	0.212 8	0.213 3	0.213 1	8	0.224 6	0.225 8	0.225 2
2	0.215 1	0.215 6	0.215 4	9	0.225 5	0.226 2	0.225 9
3	0.217 1	0.217 6	0.217 4	10	0.226	0.226 4	0.226 2
4	0.219 5	0.220 1	0.219 8	11	0.226 5	0.226 7	0.226 6
5	0.220 0	0.220 7	0.220 4	12	0.227 2	0.227 6	0.227 4
6	0.221 8	0.222 3	0.222 1	13	0.227 6	0.227 6	0.227 6

由表8可知:随着温-湿度循环的进行,钢渣泡沫混凝土的导热系数逐渐增高,但是增高的趋势趋于平缓,其原因在于,周期性温-湿度作用会在钢渣泡沫混凝土内部产生周期性的温-湿度应力,从而使钢渣泡沫混凝土

土内部产生与其对应的微结构损伤,而且会导致钢渣泡沫混凝土内部的封闭型孔减少,连通型孔增多,进而造成钢渣泡沫混凝土导热系数上升,保温隔热能力下降,但是,由于周期性温-湿度作用造成的钢渣泡沫混凝土损伤会随着温-湿度循环的进行而趋于饱和,因此,钢渣泡沫混凝土导热系数增高的趋势趋于平缓。

图6为钢渣泡沫混凝土导热系数和周期性温-湿度循环次数的关系曲线,由图6可知,钢渣泡沫混凝土导热系数并不是沿直线增加,曲线的斜率越来越小,通过软件拟合如式(5)。

$$\lambda = 0.19861 + 0.01073 \ln(n + 3.0034), R^2 = 0.9875 \quad (5)$$

式中: n 为周期性温-湿度循环次数。

3 结 论

1) 钢渣泡沫混凝土的导热系数随含水率的增加并不是沿直线增加,且增加趋势平缓,其原因在于钢渣泡沫混凝土内部的开口孔数量一定,当所有的连通孔均充满水时,通过固液传递和液液传递的热量达到极限,所以钢渣泡沫混凝土导热系数不会一直增长下去。

2) 钢渣泡沫混凝土的导热系数随两侧表面温度的升高而升高,且二者之间有良好的线性关系。

3) 钢渣泡沫混凝土的导热系数随着温-湿度循环的进行逐渐增高,但增高趋势平缓,其原因在于周期性温湿-度作用造成的钢渣泡沫混凝土损伤会随着温-湿度循环的进行而趋于饱和,因此,钢渣泡沫混凝土导热系数增高的趋势越来越小。

参考文献:

- [1] 李克亮,邢朝燕,陈爱玖,等. 页岩陶粒泡沫混凝土性能与保温机理研究[J]. 混凝土,2017(12):75-78.
- [2] 张欣,周海兵,陈飞宇,等. 充填用煤矸石泡沫混凝土的制备与性能研究[J]. 硅酸盐通报,2015,34(6):1470-1474.
- [3] 王丕杰,张泽平,宫立,等. 煤矸石保温混凝土导热系数试验研究[J]. 混凝土,2016,326(12):138-141.
- [4] 田稳苓,熊清清,姜芳祿. 粉煤灰泡沫混凝土性能影响因素分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版),2013,26(1):46-49.
- [5] 于水军,李彬,陈晓利. 钢渣-粉煤灰泡沫混凝土性质的研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2016,35(1):130-135.
- [6] TOSUN Y İ. Shale stone and fly ash landfill use in landslide hazardous area in sirnak city with foam concrete[J]. Geomaterials, 2014, 4(4):141-150.
- [7] 廖洪强,何冬林,郭占成,等. 钢渣掺量对泡沫混凝土砌块性能的影响[J]. 环境工程学报,2013,7(10):4044-4048.
- [8] 徐婷婷,詹树林. 含湿多孔建材有效导热系数的理论推算[J]. 低温建筑技术,2010,144(6):119-120.
- [9] 吴胜军,彭浩,言彬. 防护热板法导热系数测试仪偏差修正方法[J]. 上海计量测试,2011,224(4):41-42.
- [10] 王旭东,蒋美萍. 稳态平板法测导热系数精度的研究[J]. 大学物理实验,2011,24(5):97-99.
- [11] 石司琴. 钢渣泡沫混凝土保温性能研究[D]. 马鞍山:安徽工业大学,2016.
- [12] 傅志前. 不同含水率麦秸砖墙导热系数试验研究[J]. 建筑材料学报,2013,16(6):1017-1019.
- [13] 刘大龙,赵辉辉,刘向梅,等. 不同含水率下生土导热系数测试及对建筑能耗的影响[J]. 土木建筑与环境工程,2017,39(1):20-25.
- [14] 徐婷婷. 墙材含水率对墙体热工性能的影响研究[D]. 杭州:浙江大学,2010:21-57.

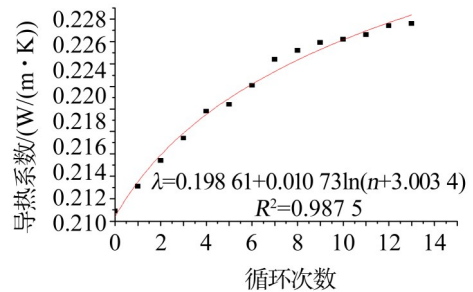


图6 钢渣泡沫混凝土导热系数和循环次数的关系

Fig. 6 Relationship between thermal conductivity and cycle times of steel slag foamed concrete