

文章编号:1672-3031(2017)05-0354-06

## 渠道保温材料保温性能演化规律的试验研究

赵波, 李敬玮, 孟川, 陈改新

(中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

**摘要:** 渠道冻害是寒区水利建设中的常见问题, 采用衬砌保温措施是目前常见的防治方法, 本文选择了6种常见的发泡保温材料, 其中包括4种硬质发泡材料(不可卷曲)和2种软质发泡材料(可卷曲), 研究了它们在应力、浸水及冻融情况下保温效果的变化规律。试验发现, 软质材料在保温稳定性方面有一定优势, 但力学性能无法满足工程需要。硬质材料中EVA保温板、XPS保温板和EPS保温板具有非常接近的长期保温效果, 而在力学性能方面XPS和EPS更有优势。影响EPS和XPS保温板长期保温性能的首要因素是冻融问题, 所以改善聚苯乙烯保温板抗冻融性能具有重要的现实意义。

**关键词:** 渠道; 保温材料; 冻融; 导热系数

**中图分类号:** TV698.2

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13244/j.cnki.jiwhr.2017.05.004

### 1 研究背景

在我国北方地区, 渠道工程普遍存在一定程度的冻害问题, 其中混凝土衬砌板发生的隆起、鼓胀和滑塌是主要表现形式<sup>[1]</sup>。目前针对渠道床基冻胀引起的刚性渠道衬砌板的破坏, 采用保温材料防止或减轻基土负温来解决冻胀问题取得了一定的效果<sup>[2]</sup>, 但由于防渗层可靠性不高, 保温材料由吸水、冻胀等原因导致保温效果逐渐降低<sup>[3-4]</sup>。聚苯乙烯发泡保温材料, 包括EPS(聚苯乙烯膜塑板)保温板和XPS(聚苯乙烯挤塑板)保温板, 在渠道保温工程中应用较多。导热系数是材料本身固有的属性, 表征物质传递热量能力的大小<sup>[5]</sup>。有研究者<sup>[6-7]</sup>考察了EPS保温板在不同吸水率下的导热系数变化, 并研究了干燥条件下的压缩性能和蠕变性能, 但针对保温材料在使用过程中, 即受力、浸水和冻融等综合条件下的保温性能变化规律的研究并未涉及。本文选择市场上常见的6种发泡保温材料, 针对应用条件研究它们保温性能的演化规律, 以加深保温材料在渠道长期应用过程中保温性能变化的认识, 并对材料的改性方向提出建议。

### 2 试验概况

**2.1 试验材料** 本文的目的是针对渠道保温应用条件, 对有代表性的常见发泡保温材料的应用性能进行研究, 关注点是其保温性能在长期应用中的变化规律。选择的材料按硬度分为两类, 一类为硬质发泡材料, 不可卷曲, 正常形态为板状; 另一类为软质发泡材料, 可以卷曲, 正常形态可为板状, 也可卷曲为卷材状。为了保证在有水环境下长期的良好性能, 选择进行试验的所有发泡材料均为闭孔材料。本文试验中的发泡保温材料基本信息见表1。

**2.2 试验方案** 在渠道工程运行中, 对保温材料长期保温性能影响较大的环境因素主要包括: 应力、浸水及冻融。由于保温材料长期受压于渠道衬砌板下方, 从结构稳定性方面考虑, 要求保温材料有较好的长期压缩性能。因此, 试验主要研究在水浸泡和冻融条件下, 材料力学性能和导热性能的变化。具体试验方案如下。

收稿日期: 2016-11-03

基金项目: 流域水循环模拟与调控国家重点实验室自主研究课题(2014QN05)

作者简介: 赵波(1970-), 男, 天津人, 博士, 高级工程师, 主要从事水工材料研究。E-mail: zhaobo@iwhr.com

表1 试验用保温材料

序号	材料名称	材质	实测密度/(kg/m <sup>3</sup> )	材料类型
1	EPS模塑板	聚苯乙烯	26	硬质
2	XPS挤塑板	聚苯乙烯	30	
3	EPDM发泡板	三元乙丙	82	
4	EVA发泡板	乙烯-醋酸乙烯酯共聚物	135	软质
5	EPE珍珠棉板	聚乙烯	21	
6	PEF发泡板	交联聚乙烯	24	

2.2.1 压缩性能试验 关于材料的压缩性能,不同类型的发泡材料采用不同的标准进行测试,其中硬质泡沫材料采用的测定标准为:《硬质泡沫塑料 压缩性能的测定规定》GB/T 8813,压缩强度为压缩变形10%以内的最大强度 $\sigma_m$ ;软质泡沫材料采用的测试标准为:《高聚物多孔弹性材料 压缩应力应变特性测定》GB/T 18942,试验中压缩率(压缩后厚度/初始厚度)为 $CV_{40}$ 的应力应变特性,最大压缩强度为C40 kPa。

2.2.2 蠕变性能试验 为了确定材料在长期应力作用下的变形情况,试验测定了材料的蠕变性能。根据文献[8]的资料,南水北调中线总干渠明渠的混凝土衬砌板设计厚度为8—10 cm,渠道设计水深一般为3.8—8.0 m。本文假设混凝土衬砌板的厚度为10 cm,以8 m的运行水深作为受力计算的基础。混凝土的密度按2.5 g/cm<sup>3</sup>计,则去除浮力后,10 cm厚度衬砌相当于15 cm水深,所以保温材料在满水位运行时受到的压力相当于8.15 m水深压力,相当于0.08 MPa的压力,即80 kPa的压力,由此确定蠕变试验中的加载应力为80 kPa。

图1为蠕变试验装置。在上、下垫板之间对称放置4块待测定的保温材料,压头与试验机连接,试验机为新三思CMT5504万能电子材料试验机,利用试验机的恒压控制模式进行试验。

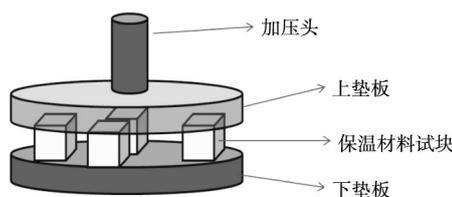


图1 蠕变试验装置

具体试验过程如下:(1)试块准备,4块立方体保温材料试块,尺寸为50 mm×50 mm×50 mm;(2)载荷设定,按试验设计,试块受压为80 kPa,试验机恒定压力设定为800 N;(3)将4块待测试样均匀布置在上、下垫板之间,使试验压力均匀、平衡地作用在4块试样上;(4)加压速率为50 mm/min,试验开始后自动记录试验数据。

试验分别测定了浸水前和浸水28 d(吸水率测定试验表明,28 d材料基本达到饱和)后的蠕变性能,以研究浸水对材料蠕变性能的影响。

2.2.3 导热系数的测定 测试仪器为EKO-HC-074-200型热导仪,测量范围:0.005~0.8 w/m·k。测试点温度为22.5℃,试样的尺寸为200 mm×200 mm×20 mm,每种材料各3块试样,测试结果取平均值。

试验中分别测试了材料浸水前和浸水不同时间的导热系数,包括4、14和28 d的导热系数,以及冻融300次后的导热系数。其中冻融试验的条件是:一个循环历时2.5—4.0 h,降温历时1.5—2.5 h,升温历时1.0—1.5 h;冻融液温度-25—20℃。在完成浸水或冻融过程后,取出试件并擦干表面水分,马上进行导热系数的测定。

### 3 试验结果与讨论

3.1 浸水及冻融对压缩性能的影响 图2分别是硬质发泡板和软质发泡板的典型压缩曲线。其中,图2(a)为4个XPS试样得到的压缩曲线,从图中可见,重现性比较好;图2(b)为1个软质EPE保湿板试样的压缩曲线,经过4次压缩循环后得到的最终结果。

表2是4种硬质材料和2种软质材料的压缩性能试验结果。由于采用的标准不同,无法直接比较,但可以进行一个简单的对比。表2中压缩强度是硬质材料在压缩变形为10%时的数据,而软质

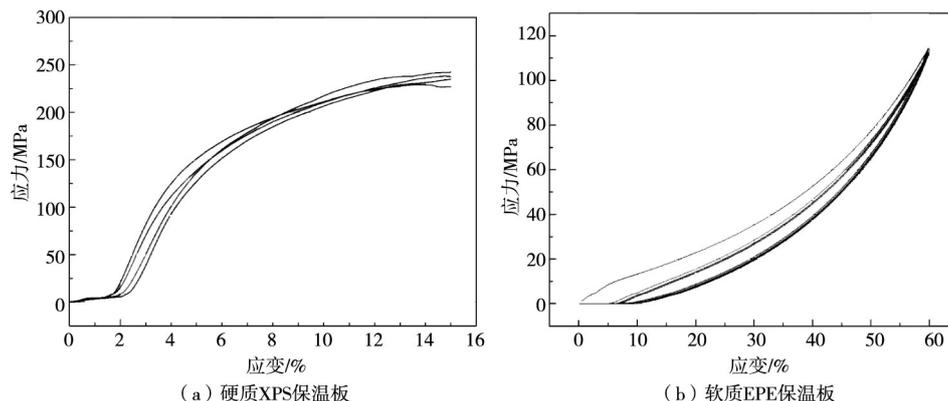


图2 硬质发泡材料与软质发泡材料典型压缩试验曲线

材料在经过1个加载循环后，对应10%变形的应力基本为零，加载周期完成后当载荷为80 kPa时，2种材料的压缩变形均在50%~60%之间。

另外从表2数据可见，EPS、EVA和XPS的力学性能较好，其中XPS最好。

表2 6种硬质发泡材料的压缩强度（单位：kPa）

材料名称	$\sigma_{10}$ (10%变形)	C40(60%变形)
EPDM	32.9	
EPS	133.8	
EVA	111.7	
XPS	211.3	
PEF		96.4
EPE		112.8

### 3.2 浸水对蠕变性能和导热系数的影响

#### 3.2.1 浸水对蠕变性能的影响

图3是试验中得到的典型蠕变曲线。从图3可以看出，不同材料的蠕变曲线在幅度和形状上有明显区别。为了得到平衡蠕变量，对曲线进行了指数拟合。

表3是浸水前、后蠕变平衡压缩率数值。由表3可以看到，EPS、XPS和EVA 3种保温板干燥蠕变性能良好，其中XPS最好，但浸水后EVA发泡板蠕变量出现了较大的增加，而EPS和XPS变化较小，特别是XPS保温板几乎不受影响。而其他3种材料的蠕变量相当大，这与前面测试的压缩性能结果是相符的。

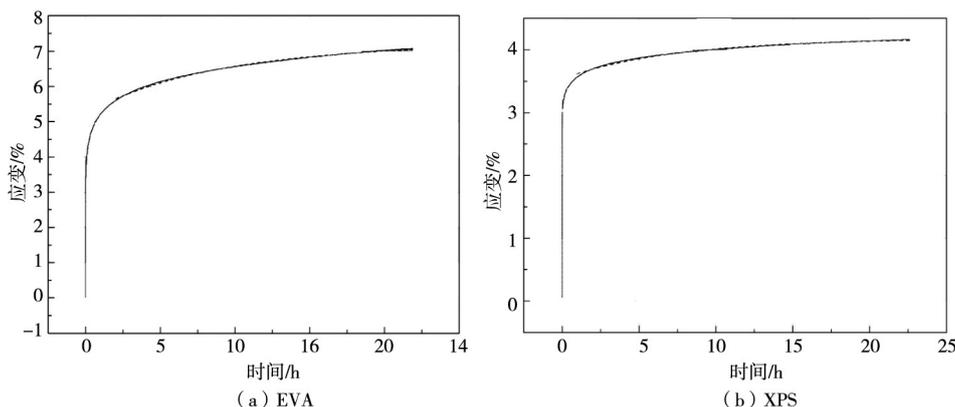


图3 试验中得到的典型蠕变曲线

3.2.2 浸水对导热系数的影响 表4是6种发泡保温板材料经过不同浸水时间的导热系数测定值。从表4可见，随着浸水时间的增加，导热系数总体趋势是增加的，浸泡14 d后导热系数变化趋缓。

3.3 冻融对材料导热系数的影响 表5是材料经过300次冻融循环后的导热系数测定值。由表5与表4对应材料的数据对比可以看出，冻融后材料的导热系数有所增大，但不同材料的增长幅度不同，其中增长幅度最大的是EPS和XPS两种聚苯乙烯材质的保温板，而其他材质保温板变化幅度相对比较小。这可能与聚苯乙烯材料分子链的刚性比较大有关系，其他材料的柔韧性比较好，在冻融过程中气泡结构不容易损伤。

表3 浸水前和浸水 28 d 的蠕变试验结果

材料名称	平衡压缩率/%	
	干燥	浸水
EPS	92.9	90.8
XPS	95.8	95.7
EVA	92.8	80.5
EPDM	50.9	45.4
EPE	22.4	24.6
PEF	21.5	

注：PEF发泡板浸水后变形严重，未能进行蠕变试验。

表4 不同浸泡时间的导热系数 (单位: w/m·k)

材料名称	浸泡时间/d			
	0	4	14	28
EPS	0.04023	0.04543	0.04773	0.04751
XPS	0.03395	0.03744	0.03798	0.03791
EVA	0.05008	0.05193	0.05235	0.05266
EPDM	0.03725	0.03812	0.03860	0.03893
EPE	0.05712	0.05869	0.05845	0.05934
PEF	0.03641	0.03616	0.03588	0.03583

表5 冻融循环300次后6种材料的导热系数

(单位: w/m·k)

	EPS	XPS	EVA	EPDM	EPE	PEF
导热系数	0.06970	0.06718	0.05219	0.03957	0.05602	0.03954

### 3.4 关于试验结果的进一步讨论

3.4.1 关于导热系数 图4将6种材料的初始导热系数和浸水及冻融后的导热系数进行了比较，从图4可以看到，有些材料的导热系数，如EPDM、PEF、EVA及EPE，都有很好的稳定性，这对保持长期保温效果是非常有利的。EPS和XPS的初始导热系数是比较优异的，但浸水和冻融对他们的影响比较大，特别是冻融，使两种聚苯乙烯材质的保温板导热系数大大升高，这对渠道长期保温效果是不利的。由于EPS和XPS在渠道保温上的广泛应用<sup>[9-10]</sup>，针对这两种材料长期保温性能的改进有重要的现实意义。而针对这两种材料，如何提高其抗冻融性能应该是材料改进研究的方向。

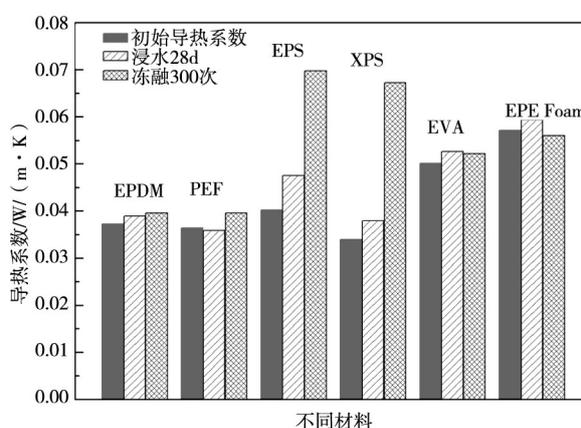


图4 浸水和冻融对材料导热系数的影响程度

3.4.2 关于长期保温效果 表6汇总了保温板整体保温效果的影响因素。保温效果与保温材料的厚度和导热系数直接相关，保温材料的厚度在应用过程中由于受力而有所减少。发泡材料厚度变化过程中会导致材料发泡结构方面的变化，如气泡体积密度、大小分布等，会影响到导热系数的数值。但这方面的影响非常复杂，没有统一的规律，另外这种因素引起的导热系数变化在试验测定上和存在一定的困难，本文中暂时不考虑这个因素。

为了讨论各因素的综合影响，在此将运行过程中的由于受力蠕变、吸水及冻融等作用的影响定义为抗衰减系数 $\delta$ ，可表示为：

表6 导热效果影响因素汇总

材料名称	原始导热系数/ (w/m·k)	浸水蠕变平衡压缩率 C/%	导热系数 饱水保持率A	导热系数冻融保持率F
EPS	0.04023	90.8	0.85	0.68
XPS	0.03395	95.7	0.90	0.56
EVA	0.05008	80.5	0.95	1.00
EPDM	0.03725	45.4	0.96	0.98
EPE	0.05712	24.6	0.96	1.06
PEF	0.03641	21.5(干燥)	1.01	0.91

$$\delta = C \times A \times F$$

其中： $C$ 为饱水蠕变平衡压缩率； $A$ 为导热系数饱水保持率； $F$ 为导热系数冻融保持率。

利用这个参数，可以对运行过程中保温效果的衰减进行评价，抗衰减系数越大，在运行过程中长期保温效果也越好。

保温效果与导热系数成反比，与抗衰减系数成正比，由此定义一个相对保温系数 $\eta$ ：

$$\eta = \delta / \varepsilon$$

其中， $\varepsilon$ 为导热系数。

相对保温系数可以比较相同初始厚度的不同保温材料长期运行的相对保温效果。试验研究的6种保温材料长期保温效果的比较见表7。

表7 6种发泡保温板的相对保温效果比较

	EPS	XPS	EVA	EPDM	EPE	PEF
导热系数 $\varepsilon$	0.04023	0.03359	0.05008	0.03725	0.05712	0.03641
抗衰减系数 $\delta$	0.53	0.48	0.76	0.43	0.25	0.20
相对保温系数 $\eta$	13.17	14.30	15.18	11.54	4.38	5.49

由表7可见，如果采用相同厚度的保温板，硬质类型的保温板具有明显的优势，其中长期运行保温效果最好的是EVA发泡板，其次为XPS和EPS，他们的长期保温效果是比较接近的。而软质保温板由于压缩强度太低，在应用中有效保温厚度大幅降低，虽然其他方面性能都很好，但总的效果仍然不理想。

## 4 结论

通过对市场常见的6种保温材料在渠道应用条件下保温性能影响因素的试验研究，可以得出如下结论：(1)在输水渠道保温应用条件下，具有较好抗压缩蠕变的材料具有更好的保温稳定性，本文选择的硬质保温材料如EVA板、XPS板及EPS板的长期保温效果明显好于软质材料的EPE板和PEF板。(2)软质发泡保温材料在吸水和冻融条件下导热系数的保持率比较高，但由于压缩蠕变性能差，在水压力作用下厚度大幅降低，从而导致实际保温性能不佳。另外力学性能也不能满足设计需要，受力压缩量太大易引起衬砌的稳定性问题。(3)从试验研究结果看，EVA保温板，XPS保温板及EPS保温板具有良好的长期保温效果，而且保温效果接近。

## 参 考 文 献：

- [ 1 ] 郑永志. 浅析混凝土渠道冻胀的原因及其维修措施[J]. 建筑工程技术与设计, 2015(9): 711.
- [ 2 ] 银英姿, 王英浩, 宋云驰. 渠系水工建筑物保温措施的研究及计算机模拟[J]. 内蒙古科技大学学报, 2007, 26(2): 183-186.
- [ 3 ] 郑朝辉. 建筑材料导热系数的影响因素及测定方法[J]. 工程质量, 2008(4): 15.
- [ 4 ] 王圣妹, 陆燕静, 张宗德, 等. 含湿率与容重对保温材料隔热性能影响的研究[C]//绝热材料的前景与施工. 北京: 中国绝热节能材料协会, 2002.
- [ 5 ] 杨强胜, 蒲保荣. 高等传热学[M]. 第二版. 上海: 上海交通大学出版社, 2001.
- [ 6 ] 那文杰, 张滨, 吴富平. 寒区水工建筑物EPS保温板性能的实验研究[J]. 黑龙江水利科技, 2005, 33(2): 5-8.
- [ 7 ] 郭磊, 李胜英, 马彪, 等. 吸湿对外墙保温系统常用保温材料导热系数的修正研究[J]. 新材料, 2014(5): 81-83.
- [ 8 ] 沈凤生. 南水北调中线一期总干渠明渠渠道工程设计有关问题的探讨[J]. 水利水电技术, 2009, 40(8): 95-98, 107.
- [ 9 ] 常凤生, 高树天, 黄延贺, 等. 聚苯乙烯泡沫板在渠系建筑物保温中的应用[J]. 东北水利水电, 2005(7):

13-14.

- [10] 申利刚,程满金,杨宏志,等.渠道衬砌铺设聚苯乙烯板防冻害试验研究[J].内蒙古水利,2001(3):12-14,29.

## The evolutionary process of thermal insulation properties of material used on channel

ZHAO Bo, LI Jingwei, MENG Chuan, CHEN Gaixin

(*Station Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China;*

*China Institute of Water Resource and Hydropower Research, Beijing 100038, China)*

**Abstract:** The frozen damage in channel is regarded as the common problems in water project construction, and the insulation measures is the common control methods at present. 6 kinds of foam insulation materials, including 4 kinds of hard material and 2 kinds of flexible material, are studied in this paper under the condition of stress, immersion and freezing thawing. It shows that the mechanical properties of flexible materials cannot meet the needs of engineering, although it has certain advantages in terms of long-term thermal insulation stability. The hard insulation boards, made of EVA, XPS and EPS, have a very similar long-term thermal insulation effect. In mechanical properties, the XPS and EPS boards have more advantages. The main factors that affect the long-term thermal insulation properties of EPS and XPS boards are freezing and thawing, so it has a realistic and important significance to improve the freeze-thaw resistance of polystyrene insulation board.

**Keywords:** channel; thermal insulation material; freeze thawing; thermal conductivity

(责任编辑:王冰伟)

(上接第353页)

## Numerical Simulation Research on Rock Breakage Mechanism and Influence TBM Cutters

LIU Lipeng<sup>1</sup>, WANG Xiaogang<sup>1</sup>, LIU Haijian<sup>2</sup>, SUN Xingsong<sup>2</sup>

(*1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,*

*China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;*

*2. Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Limited, Beijing 100037, China)*

**Abstract:** In order to study the rock breakage mechanism and influence of the full-face Tunnel Boring Machine (TBM) cutters, the rock breakage model of cutter was established by the Particle Flow Code(PFC). Parameters of the PFC program were calibrated by uniaxial compression and Brazilian test. The rock breakage mechanism and the influence of rock strength and confining pressure on rock fragmentation by TBM cutters are successfully studied by using numerical simulation. The results show a composite rock breaking model of the rock breaking mechanism by TBM cutters through a process of the pre-compaction, the medium-time extrusion shear failure and the late extrusion tension failure. Loading and unloading alternately occurs throughout the process of the cutter. At the same time, the cutter shows the phenomenon of jumping. It is difficult for high rock strength to produce radial cracks, and there is no obvious lateral crack expansion with low rock strength. In both cases, the effect of rock breaking of TBM cutters is not obvious, only for a certain strength range of rock is more appropriate. The confining pressure affects the formation and expansion of the crack, the higher confining pressure will inhibit the radial crack development to reduce the rock breaking effect. The research results can provide some reference for TBM selection and cutter design.

**Keywords:** Tunneling engineering; rock breaking mechanism; particle flow code; influencing factors

(责任编辑:李琳)