

# 渠道防冻胀保温板导热系数及其测定因素探讨

杨育红<sup>1</sup>, 杨永来<sup>2</sup>, 孙恒<sup>2</sup>

(1. 华北水利水电大学 水利学院, 郑州 450045; 2. 南水北调中线建管局 河南直管项目建设管理局, 郑州 450046)

**摘要:** 针对南水北调中线干线工程焦作1段工程建设中出现挤塑聚苯乙烯(XPS)保温板导热系数检测结果不符合技术要求的问题,为了明确XPS保温板导热系数对渠系防冻胀作用的影响程度,协调项目法人、设计、监理、施工等参建单位各方矛盾,在分析检测报告、检测方法和检测仪器的基础上,根据相关的国家标准和行业标准要求,对初步设计报告中提供的保温板铺设厚度进行了反推演。计算结果显示,渠系防冻胀设计用XPS保温板导热系数范围0.067~0.090 W/(m·k)。根据实际保温板铺设厚度和渠道保温板的防冻胀目的,建议XPS保温板导热系数性能指标数值选用平均温度25℃下 $\leq 0.039$  W/(m·k), 10℃下 $\leq 0.028$  W/(m·k),检测单位应该在相应平均温度下进行检测,使得原材料质量控制为工程安全运行和正常功能发挥提供有效保障。

**关键词:** 南水北调中线; 焦作1段; 防冻胀; 挤塑聚苯乙烯保温板

**中图分类号:** TV41; TV68 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)03-0191-04

## Preliminary Study on Thermal Conductivity of Insulating Board in the Channel Anti-frost heavy Practice

YANG Yurong<sup>1</sup>, YANG Yonglai<sup>2</sup>, SUN Heng<sup>2</sup>

(1. College of Water Resources, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China;

2. Henan Direction Management Division, Construction and Administration Bureau of South to North Water Diversion Middle Route Project, Zhengzhou 450046, China)

**Abstract:** The testing results of thermal conductivity of the extruded polystyrene (XPS) insulating board during the construction of Jiaozuo 1st engineering project in the Middle Route of South to North Water Diversion Project did not meet the technical requirements. In order to determine the effects of thermal conductivity of the XPS insulating board on channel anti-frost heavy and to coordinate the relationships between project entity, design, management, and construction, the thickness of XPS insulating board was inversely calculated based on the analysis of test report, method, and instrument and the related national and industrial standards. The results showed the thermal conductivity values of XPS insulating board in the channel anti-frost heavy practice range from 0.067 to 0.090 W/(m·k). According to the actual thickness of insulating board and the anti-frost heavy practice, the suggested thermal conductivity values of XPS insulating board were 0.039 W/(m·k) when the mean temperature was below 25℃ and 0.028 W/(m·k) when the mean temperature was below 10℃. The scientific assignment to thermal conductivity is the key to ensure the project quality.

**Key words:** South to North Water Diversion Middle Route Project; Jiaozuo 1st project; anti-frost heavy; XPS insulating board

我国北方地区的渠系构筑物和渠道衬砌在冬季运行过程中均存在不同程度的冻胀破坏问题<sup>[1]</sup>,为防止冬季气温下降在渠底或渠坡出现冻胀破坏现象,渠系防冻胀设计至关重要。常用的渠道防冻胀措施有保温和置换两种。由于具有自重轻、强度高、吸水性能低、隔热性能好、运输和施工方便等优点,近年来挤塑聚苯乙烯保温板(Rigid extruded polystyrene foam board,简称XPS保温板)逐渐被用于渠道的防冻胀

处理<sup>[2,3]</sup>。南水北调东线南干渠工程中也把XPS保温板选作渠道防冻胀材料<sup>[4]</sup>,中线京石段铺设保温板的渠道在建设期和输水期的预防冻胀作用较为明显<sup>[5]</sup>。渠道的冻胀破坏是土壤中的水、土体颗粒物理性质和负温所致。不同的渠道防冻胀设计单元所处地理位置不同,渠道铺设厚度和保温板铺设厚度不同,保温板的导热系数执行的技术要求也不同。

焦作1段是南水北调中线干线工程中唯一穿市区而过

收稿日期: 2013-11-21 修回日期: 2013-04-23 网络出版时间: 2014-05-08

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.03.040.html>

基金项目: 国家科技支撑计划项目“重点领域气候变化影响与风险评估技术研发与应用”(2012BAC19B03)

作者简介: 杨育红(1971-),女,河南焦作人,讲师,博士,主要从事水利工程环境影响方面的研究。E-mail: yangyuhong@ncwu.edu.cn

的明渠工程,项目法人、监理单位、施工单位委托的原材料抽样检验单位有黄河水利委员会基本建设工程质量检测中心、国家轻工业塑料产品质量监督检测武汉站、河南建院建筑材料检测有限公司。截止 2013 年 9 月,项目法人抽检、监理平行检测和施工单位自检的原材料检验报告统计结果显示,焦作 1 段工程渠道衬砌用保温板导热系数超标范围在 0.028 5~0.033 W/(m·k) 之间。导热系数检测结果与设计的要求不符,部分保温板导热系数不满足设计要求。南水北调中线干线工程质量保障体系要求不符合技术指标的原材料一律按退场处理,禁止用于工程建设中。保温板导热系数超标导致的原材料频繁退场现象影响了渠道衬砌进度,而同一批次原材料不同单位检测结果迥异,为消除安全隐患,确保工程防冻胀效果,屡次向建管单位反映,要求协商设计单位调整指标,工程监理单位、施工单位和监理单位对已衬砌渠道的 XPS 保温板的保温质量亟需得到理论支持。

本文拟通过对工程建设用保温板的导热系数进行反推率定,对其检测方法进行分析,为不合格原材料退场提供理论支撑,为渠道工程建设防冻胀质量提供实际指导。

## 1 工程基本情况

### 1.1 工程概况

焦作 1 段位于东经 113°10′-113°20′、北纬 35°12′-35°17′ 之间,渠线基本沿太行山前丘陵岗地之间和山前倾斜平原经过,区内地势北高南低,西高东低,沿线土层多为黄土状壤土。渠段抗冻设计气候类型属于寒冷气候区,多年平均气温 15.2℃,全年 1 月份温度最低,平均气温 1.0℃;月平均最低气温 -3.2℃,极端最低气温 -17.8℃;7 月份气温最高,月平均气温 27.5℃,月平均最高气温 32.1℃,极端最高气温 43.3℃。最早地面稳定冻结初日在 12 月 9 日,最晚开始解冻日期在 2 月 19 日,历年最大冻土深度 19 cm,多

年平均冻深 10.72 cm。多年平均水面蒸发量为 1 120 mm,陆面蒸发量为 550 mm。段内冬春季盛行西北风,夏季多东南风,秋季多东北风,多年平均风速 1.9~2.7 m/s;全年最多风向为西北风,最大风速 22.0 m/s。该段属季节性冻土发生区,标准冻深值、冻胀量均较大,分属 0 至 0 类冻胀区。

工程渠段总长 12.9 km,其中明渠长 10.985 km,建筑物长 1.915 km,设计流量 265 m<sup>3</sup>/s,加大流量 320 m<sup>3</sup>/s,设计渠水深 7.0 m。工程区地面高程一般在 95~110 m,渠道过水断面采用梯形断面,在不同的地形条件下,分别采用全填(3.598 km)、半挖半填(7.387 km)两种型式。

工程于 2009 年 7 月开工,计划 2013 年 12 月底完成主体工程建设,2014 年实现汛后通水目标。渠道衬砌施工工艺流程为:施工准备→渠床整理→排水暗管系统安装→砂砾料垫层施工→聚苯乙烯保温板铺设→复合土工膜施工→衬砌混凝土→养护→切缝→养护。防冻胀保温板布设示意图 1。

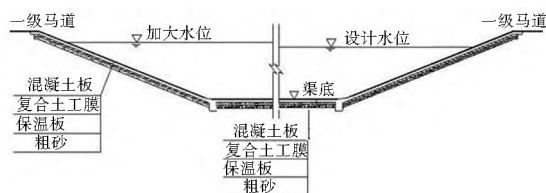


图 1 焦作 1 段保温板布设示意图

Fig. 1 Design chart of XPS insulating board in Jiaozuo 1st project

### 1.2 工程材料

XPS 保温板,是以聚苯乙烯树脂或其共聚物为主要成分,添加少量添加剂,通过热挤塑成型而制得的具有闭孔结构的硬质泡沫塑料。焦作 1 段渠道工程防冻胀用保温板均为挤塑聚苯乙烯保温板,规格型号为 3 000 mm×800 mm×20 mm。焦作 1 段 XPS 板性能指标的设计要求、招标文件要求以及国家标准和行业标准详见表 1。

表 1 渠道衬砌挤塑聚苯乙烯保温板质量要求

Table 1 Quality requirement of XPS insulating board used in canal lining

项目	单位	性能指标(带表皮)				招标文件	技术要求
		GB/T 10801.2-2002		SL 23-2006			
		X150	X300	0 型	0 型	焦作 1 段	
表观密度/(kg·m <sup>-3</sup> )		/	/	≥30	≥40	≥40	≥40
吸水率(%)		≤1.5	≤1.0	≤2	≤2	≤2	≤2
压缩强度/kPa	(相对变形 5%)	≥150	/	/	/	≥150	≥150
	(相对变形 10%,)	/	≥300	≥150	≥300	≥300	≥300
尺寸稳定性(%)		≤2.0(70±2℃下,48 h)	≤1.5(70±2℃下,48 h)	≤2(-40℃~+70℃)	≤±0.5(-40℃~+70℃)		
导热系数/(W·(m·k) <sup>-1</sup> )		≤0.028(平均温度 10℃)	≤0.030(平均温度 25℃)	≤0.039	≤0.039	≤0.039	≤0.028

### 1.3 设计规范

南水北调中线工程各设计单元初步设计批复时间跨度大,经历了《渠系抗冻胀设计规范》(SL 23-91)和《渠系抗冻胀设计规范》(SL 23-2006)两个规范执行期。两个规范最大差别是设计冻深计算不同,前者基于历年最低气温的平均值,后者基于历年最低气温。在其它外部条件相同情况下,采用同样的保温措施,按照 SL 23-2006 设计的保温层厚度要大于按照 SL 23-91 的设计厚度。焦作 1 段防冻胀设计报告

于 2006 年 3 月编制完成,而 SL 23-2006 规范于 2006 年 10 月发布。

## 2 研究方法 with 结果讨论

本研究利用焦作 1 段保温板厚度设计结果,结合工程实际保温板铺设厚度,在分析历次检测报告的基础上,对照现行 SL 23-2006 规范,重新调整参数取值,确定保温板导热系数范围,并对保温板导热系数检测方法进行分析对比。

### 2.1 导热系数指标反推

按照SL 23 91 规范,南水北调中线干线工程黄河以南渠段无需进行防冻胀设计,但按照 SL 23-2006 规范,黄河以南局部渠段需要采取防冻胀设计。目前,河南段沙河以南渠道无防冻胀设计需求,黄河以南局部渠道(荥阳段)防冻胀用保温板导热系数技术要求为  $0.039 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{k})$ ,黄河以北渠道(河南段、河北段)防冻胀用保温板导热系数技术要求有  $0.044 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{k})$ 、 $0.030 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{k})$ 、 $0.028 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{k})$  三种。其中,焦作 1 段设计单元要求保温板导热系数  $0.028 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{k})$ ,渠道铺设保温板厚度  $2 \text{ cm}$ 。

保温板厚度计算采用 SL 23-2006 规范的推荐公式:

$$\delta_x = \alpha_w \lambda_x \left( R_0 - \frac{\delta_c}{\lambda_c} \right) = \lambda_b \cdot K$$

式中:  $\delta_x$  为保温材料厚度(m);  $R_0$  为工程保温基础设计热阻值( $\text{m}^2 \cdot \text{k} / \text{W}$ );  $\lambda_x$  为保温板在自然状态下的导热系数( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{k})$ );  $\alpha_w$  为保温材料的导热系数修正系数;  $\delta_c$  为基础材料厚度(m);  $\lambda_c$  为基础材料的导热系数( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{k})$ )。

在对建筑材料与绝热材料进行表征时,令  $\left( R_0 - \frac{\delta_c}{\lambda_c} \right) = K$ ,为具体断面的  $K$  因子,与基础材料的导热系数和厚度有关。令  $\alpha_w \lambda_x = \lambda_b$ ,  $\lambda_b$  为保温板使用导热系数。为方便计算,并满足最低要求,相关系数按阴面取值,推演多种情况下的导热系数,演算结果详见表 2。

表 2 焦作 1 段典型断面保温板导热系数和铺设厚度推演结果

Table 2 Thermal conductivity and width of XPS insulating board used in Jiaozuo 1st project

序号	典型断面	渠线走向	阴坡保温板					
			初设		反演			
			设计厚度 / cm	导热系数 / ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{k}^{-1}$ )	K	铺设厚度 / cm	导热系数 / ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{k}^{-1}$ )	
1	28+	143.0	NE44°	1.21	0.242			0.083
2	29+	466.0	NE70°	1.38	0.276			0.072
3	31+	081.0	NE22°	1.11	0.222			0.090
4	32+	670.0	NE22°	1.15	0.230			0.087
5	34+	196.0	NE80°	1.49	0.05	0.298	2.00	0.067
6	35+	849.0	NE80°	1.49	0.298			0.067
7	37+	500.0	NE80°	1.49	0.298			0.067
8	39+	352.0	NE80°	1.22	0.244			0.082
9	40+	847.0	NE74°	1.28	0.256			0.078

表 2 显示,反演保温板导热系数范围在  $0.067 \sim 0.090 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{k})$  之间,实际工程用保温板导热系数检测结果超过技术要求的范围为  $0.0285 \sim 0.033 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{k})$ 。由于施工过程中原材料检测按批次、按频次、按比例抽样检验,因此可能会有导热系数超标的材料被用于工程建设中。根据计算结果,在实际工况下,这些“超标”的 XPS 板的防冻胀作用在理论效果之内。在渠道运行阶段,除了采取跟踪追溯原材料去向、密切观察使用“超标”XPS 板的渠道部位变化外,建议相关单位共同协商在目前的施工阶段按情况适当调整导热系数技术要求,消除不符合技术要求的原材料用到工程中的隐患。

### 2.2 导热系数检测温度

在温度梯度与几何形状固定的情况下,导热系数代表了稳态下需要多少能量才能维持该温度梯度。试件的传热性质可能受到多种因素影响,包括材料或其样品成分的变化、含湿量、时间、平均温度、热经历等,因此,在特定应用下选用代表材料传热性质的典型数值时,应考虑以上影响因素。其中,材料的传热性质与平均温度和温度差的关系应在典型的使用条件下测量或者试验<sup>[9]</sup>。平均温度  $T_m$  通常为(试件热面温度  $T_1$ + 试件冷面温度  $T_2$ )/2,温差  $\Delta T$  通常为( $T_1 - T_2$ )。

焦作 1 段材料检测报告中,保温板的导热系数均是在室温或平均温度  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  条件下测定的,导热系数测定仪型号 CD-DR3030。GB/T 10801.2-2002 规定导热系数检测温度有  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  两种情况,而 SL/T 23-2006、招标文件、初步设计均没有明确导热系数的测试温度条件。各检测单位为方便操作和大多数样品的检测需求,没有分别对待用于房建、工民建、水利工程建设等不同的检测样品,可能导致施工用保温板导热系数测试结果不符合技术要求。而相同材料、不同温度下测试结果的差异研究未见报道,检测单位也不能提供有效的支撑材料说明,同一材料在不同平均温度下检测数值的变化情况。

XPS 保温板广泛用于建筑外墙防护,基本功能为隔热保温,防止夏季室外高温入侵,所以多数检测单位率定检测仪器按常规条件执行,一般设置检测平均温度  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。而渠道用保温板,主要功能为防寒防冻胀,预防负温引起的渠道冻胀破坏,因此其检测温度应有区别。建议送检单位加强与检测单位沟通,细化检测合同条款,明确检测温度和修订保温板导热系数。

### 3 结语

北方地区渠道防冻胀设计是维护渠道正常运行、发挥水利工程经济、社会、环境效益的重要保障,工程用保温材料的质量是确保工程质量符合要求的前提,而材料性能指标的正确选用是保证原材料质量的关键。本文就工程实际中参建各方面面临的困惑和疑虑,通过分析开工以来保温板原材料的自检、抽检、平行检测结果,根据国家标准和水利行业标准,对焦作 1 段工程用 XPS 板检测不符合技术要求的导热系数给出了参考范围。

为消除原材料给施工带来的质量隐患,在严把原材料检测关时应加强试验室管理。鉴于导热系数与平均温度有关,建议导热系数选用平均温度  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  下  $\leq 0.039 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{k})$ ,项目法人应协商检测单位补充检测合同条款,明确检测平均温度在  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  条件下,导热系数在  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  下  $\leq 0.028 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{k})$ 。科学选用原材料检测性能指标及合理确定典型数值是切实抓好原材料质量管控和监督工作的依据。

#### 参考文献(References):

[1] SL 23-2006,渠系工程抗冻胀设计规范[S].(SL 23-2006, Design code for anti frost heave of canal and its structure [S]. (in Chinese))  
 [2] 程满金,申利刚,步丰湖,等.聚苯乙烯保温板在衬砌渠道防冻胀中的应用研究[J].灌溉排水学报,2011,30(5):22-27.

- (CHENG M ar jin, SHEN L i gang, BU Feng hu, et al. Application of Polystyrene Insulation Board Used for Anti frost in Lir ing Channel [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30 (5): 22-27. ( in Chinese )
- [3] 张彦武. 聚苯乙烯泡沫板在渠道防冻胀中的运用[J]. 甘肃水利水电技术, 2009, 45(1): 7-9. (ZHANG Yar wu. Application of XPS Insulating Board in anti frost-heave of canal [J]. Gansu Water Conservancy and Hydropower Technology, 2009, 45(1): 7-9. ( in Chinese )
- [4] 胡亮, 余剑英, 李旺林, 等. 挤塑聚苯乙烯保温板在南水北调渠道工程中的应用研究[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(6): 207-210. (HU Liang, YU Jiar ying, LI Wang lin, et al. Application of XPS Insulating Board in the Channel of South to North Water Transfer Project [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(6): 207-210. ( in Chinese )
- [5] 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. (SHENG Feng sheng. Discussion on engineering design of open channel of general main canal for Phase N of Mid route of South to North Water Transfer Project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(8): 95-98. ( in Chinese )
- [6] GB/T 10294 2008/ISO 8302: 1991, 绝热材料稳态热阻及有关特性的测定防护热板法[S]. (GB/T 10294 2008/ISO 8302: 1991, Thermal Insulation Determination of Steady state Thermal Resistance and Related Properties: Guarded Hot Plate Apparatus [S]. ( in Chinese )
- 
- (上接第120页)
- [17] 李宗礼, 郝秀平, 王中根, 等. 河湖水系连通分类体系探讨[J]. 自然资源学报, 2011, 26(11): 1975-1982. (LI Zong li, HAO Xiu ping, WANG Zhong gen, et al. Exploration on Classification of Interconnected River System Network [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(11): 1975-1982. ( in Chinese )
- [18] 赵东喜, 刘永涓. 农村居民旅游消费影响因素研究[J]. 旅游论坛, 2010, 3(1): 23-27. (ZHAO Dong xi, LIU Yong juan. The Research of Dalian Industrial Heritage Tourism Development Under the Horizon of Cultural and Creative Industry [J]. Journal of Guilin Institute of Tourism, 2010, 3(1): 23-27. ( in Chinese )
- [19] 李浩. 河湖水系连通战略的经济学思考[J]. 水利发展研究, 2012, 12(7): 34-37. (LI Hao. Economy Consideration of Interconnected River System Network Strategy [J]. Water Resources Development Research, 2012, 12(7): 34-37. ( in Chinese )
- [20] 刘家学. 对指标属性有偏好信息的一种决策方法[J]. 系统工程理论与实践, 1998, 19(2): 54-57. (LIU Jia xue. A Decision Making Method that Has Favouritism Information for the Index Attribute [J]. Systems Engineering Theory & Practice, 1998, 19(2): 54-57. ( in Chinese )
- [21] 崔国韬, 左其亭. 河湖水系连通与最严格水资源管理的关系[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(2): 129-132. (CUI Guo tao, ZUO Qi ting. Relationship between Interconnected River System Network and the Strictest Water Resources Management System [J]. South to North Water Diversion and Water Science & Technology, 2012, 10(2): 129-132. ( in Chinese )
- [22] 徐慧, 杨姝君. 太湖平原圩区河网演变模式探析[J]. 水科学进展, 2013, 24(3): 366-371. (XU Hui, YANG Shu jun. Exploring the Evolution of River Networks in Plain Polders of Tai hu Lake Basin [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(3): 366-371. ( in Chinese )
- [23] 刘定惠, 杨永春. 安徽省旅游产业与区域经济耦合协调度分析[J]. 特区经济, 2011, (6): 188-190. (LIU Ding hui, YANG Yong chun. The Analysis of Coupling Coordinative Degree about Tourism Industry and Regional Economy in Anhui Province [J]. Special Zone Economy, 2011, (6): 188-190. ( in Chinese )
- [24] 庞闻, 马耀峰, 杨敏. 城市旅游经济与生态环境系统耦合协调度比较研究——以上海、西安为例[J]. 统计与信息论坛, 2011, 26(12): 44-48. (PANG Wen, MA Yao feng, YANG Min. Comparison Analysis on Coupling Relationship and Coordinated Development of Tourism Economy and Ecological Environment System: A Case of Shanghai and Xi an City [J]. Statistics & Information Forum, 2011, 26(12): 44-48. ( in Chinese )