

# 高分子柔性防渗防护材料抗老化性能研究

贾志刚<sup>1</sup>, 张鹏<sup>1</sup>, 王泳丹<sup>2</sup>, 王治堃<sup>2</sup>

(1. 中水东北勘测设计研究有限责任公司, 吉林 长春 130021;  
2. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 为了提升沥青混凝土辅助防渗防护涂层在严寒恶劣环境下的抗老化性能,以黑龙江省伊春市五星抽水蓄能电站为依托,进行上库盆防护涂层材料的耐久性能试验。采用双组分聚氨酯基涂层材料(含甲、乙组分,乙组分增加3种增韧剂)通过正交试验设计,结合抗渗试验、拉伸试验与界面粘结试验,评价增韧涂层的抗老化表现。结果表明:在0℃低温条件下,新型柔性涂层材料能够满足设计渗透水压力500 kPa的抗渗要求。紫外老化作用导致涂层材料的玻璃化转变温度升高、比热变化减小,表明其分子链段运动能力下降,自由体积减少。经1000 h紫外老化测试后,拉伸强度保持率不低于85%,断裂伸长率保持率不低于85%,弹性恢复率保持比例不低于90%。三种增韧剂(邻苯二甲酸二丁酯、聚醚多元醇和磷酸三甲酚酯)均有助于改善涂层材料在老化后的力学性能,其中邻苯二甲酸二丁酯含量对材料韧性的影响尤为显著。

**关键词:** 防渗防护材料;抗渗性能;抗老化;评价指标;力学性能;正交设计

中图分类号: TV441

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)06-0130-07

## Anti-aging Performance of Polymer Flexible Anti-seepage Protection System

JIA Zhigang<sup>1</sup>, ZHANG Peng<sup>1</sup>, WANG Yongdan<sup>2</sup>, WANG Zhikun<sup>2</sup>

(1. China Water Northeastern Investigation, Design & Research Co., Ltd., Changchun, Jilin 130021, China;

2. College of Water Resources and Architecture Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In order to improve the anti-aging performance of asphalt concrete auxiliary impermeable protective coating in severe cold and harsh environment, the durability of protective coating materials in the upper reservoir basin of Yichun City, Heilongjiang Province, was carried out based on the 5-star pumped storage power station. The two-component polyurethane-based coating materials (including A, B components, totaling 8 raw materials) through orthogonal experimental design, combined with impermeable test, tensile test and interface bonding test, the anti-aging performance of the toughened coating was evaluated. The results showed that under the condition of low temperature of 0℃, the new type of flexible coating materials could meet the design permeable water pressure of 500 kPa. The ultraviolet aging caused the glass transition temperature of the coating to increase and the specific heat to decrease, which indicated that the mobility of its molecular chain segments decreased and the free volume decreased. After 1000 hours of ultraviolet aging, the retention rate of tensile strength was not less than 85%, the retention rate of elongation at break was not less than 85%, and the rate of elastic recovery rate was not less than 90%. The three tougheners (dibutyl phthalate, polyether polyol and triphenylate) all contributed to the improvement of the mechanical properties of the coating materials after aging, among which the content of dibutyl phthalate had a particularly significant effect on toughness of the materials.

**Keywords:** anti-seepage protective coating material; anti-seepage performance; anti-aging performance; evaluation indicators; mechanical properties; orthogonal design

水库、蓄水池、河堤等水利水电工程中,都会采用涂层材料进行防渗处理,在面板基材表面涂覆涂层材料,起到防渗漏、保护建筑物安全的作用<sup>[1-3]</sup>。由基材和涂层材料组成防渗体,基材是刚性的,主要承担结构支撑作用,涂层材料是柔性的,主要承担防渗作用<sup>[4-6]</sup>。在实际工程中,由于水工建筑物不均匀沉降、应力集中、温度变化、紫外辐射、冻胀等原因,涂层可能产生裂缝。同时,在低温状态下,涂层材料容易变硬,此时基材开裂容易将涂层材料拉裂,导致渗漏,危害水工建筑物安全<sup>[7-9]</sup>。为此,有必要分析涂层材料的抗老化性能。相关研究如:赵成先等<sup>[10-11]</sup>分析了寒冷环境下大坝混凝土保温技术及表孔溢流道混凝土表面的防护修补,提出了大坝等建筑物的防渗需求。李晓娜等<sup>[12]</sup>借助 ADINA 软件分析了涂层厚度对防渗效果的影响。研究表明:虽然涂层厚度的增加可以增加防渗效果,但在项目投资上也会有一定增加。刘纪亮等<sup>[13-14]</sup>认为高性能改性聚合物砂浆具有较好的防渗效果。借助防剥落试验,李炳奇等<sup>[15-16]</sup>发现改善涂层弹性模量可对涂层防渗效果起到积极作用。然而,在环境因素作用下,涂层材料易老化,严重影响其抗渗性能,随后李炳奇等<sup>[17-18]</sup>借助室内老化和参数拟合试验,发现聚氨酯键对涂层老化性能有重要影响。刘小楠等<sup>[19]</sup>发现聚氨酯涂层体系对大坝防渗有重要作用。孙丛涛等<sup>[20]</sup>通过系统对比阐明,成膜型涂层(如聚脲)的物理屏障性能最优,为涂层选型提供了关键依据。齐孟等<sup>[21]</sup>利用氧化石墨烯(GO)改性水泥基渗透结晶型防水材料,从内部显著提升了涂层的致密性与抗渗性。来晓鹏等<sup>[22]</sup>受仿生学启发,成功制备了TA/SiO<sub>2</sub>疏水涂层,其独特的微纳结构能主动斥水并高效阻隔离子渗透。张飞凡等<sup>[23]</sup>在综述中指出,疏水涂层技术代表了从被动防护到主动拒水、防冰等多功能防护的发展方向。

已有文献表明,涂层厚度、弹性模量、材料组成等因素均对防渗性能具有重要影响,但研究大多集中在单一性能或某一老化因素上的分析。基于此,本文结合黑龙江省伊春五星抽水蓄能电站上库盆需求,通过测试老化后材料的拉伸性能、抗渗性能以及界面粘结性能,对防渗防护材料进行配方优化,以期提升其耐老化性能。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 基础配方

考虑到此类材料双组分比单组分储藏时间更

长,后期根据施工工况还可灵活调整双组分之间的比例,基于多年研究经验,并通过对试验结果比较,配方设计采用甲、乙双组分。甲组分四种材料质量配比为13:15:40:32,均为液体质量。甲、乙组分的基础配方,如表1所示。乙组分质量配比为58.8:38:3:0.2,轻质碳酸钙(1250目)为固体粉末质量,4,4'-二叔辛基-二苯胺为固体质量,另外两种材料为液体质量。

表1 基础配方

组分	序号	原料名称	生产厂家	质量配比
甲	1	聚己二酸新戊二醇-1,6-己二醇酯二醇	蓝星东大	13.0
	2	聚氧化丙烯-蓖麻油多元醇	济宁利多化工有限公司	15.0
	3	聚丁二醇-丙烯腈共聚二胺	韩国SK	40.0
	4	异氰酸酯	蓝星东大	32.0
乙	1	氧化丙烯二醇(分子量2000)	陶氏化学	58.8
	2	轻质碳酸钙(1250目)	灵寿县百鑫新材料科技有限公司	38.0
	3	三乙醇胺	广州穗欣化工有限公司	3.0
	4	4,4'-二叔辛基-二苯胺	广东元丰化学试剂有限公司	0.2

### 1.2 耐老化配方

经多次试验发现,将邻苯二甲酸二丁酯、聚醚多元醇和磷酸三甲酚酯三种材料在乙组分中组合使用具有明显抗老化增韧效果。合适的添加范围是:邻苯二甲酸二丁酯为乙组分总质量的17.8%~19.8%、聚醚多元醇(分子量8000)为乙组分总质量的10.0%~14.0%,磷酸三甲酚酯为乙组分总质量的1.0%~5.0%。采用正交设计方法对抗老化增韧剂配方比例进行优化分析,具体如表2所示。三种组分A、B、C分别为邻苯二甲酸二丁酯、聚醚多元醇、磷酸三甲酚酯,每个组分有三个质量比例水平。将以上三种原料,替换掉部分氧化丙烯二醇(分子量2000),A、B、C三种组分与氧化丙烯二醇(分子量2000)占乙组分质量比例之和为58.8%。

### 1.3 合成过程与工艺

采用聚己二酸新戊二醇-1,6-己二醇酯二醇、聚氧化丙烯-蓖麻油多元醇、聚丁二醇-丙烯腈共聚二胺与异氰酸酯类原料制成的聚氨酯预聚体作为甲组份。乙组分制备方式按前期相关研究进行<sup>[24]</sup>。使用时,按照甲组分质量与乙组分质量之比为1:2进

行混合(甲、乙组分均为提前制备好的液体,混合时无需加入其他溶液),其中甲组分按 1.1 节描述的材料配比制备,乙组分按照 1.1—1.2 节描述的材料配比进行制备,按表 2 共需制备 9 组乙组分。甲、乙完全混合后涂覆至相应试验模具中或界面上,完全固化后进行防渗涂层材料的试验。

表 2 正交试验方案表 单位:/wt%

编号	组分 A	组分 B	组分 C
1	17.8	10.0	1.0
2	17.8	12.0	3.0
3	17.8	14.0	5.0
4	18.8	10.0	3.0
5	18.8	12.0	5.0
6	18.8	14.0	1.0
7	19.8	10.0	5.0
8	19.8	12.0	1.0
9	19.8	14.0	3.0

#### 1.4 抗老化试验

紫外老化试验主要对样品因紫外光产生的劣化作用进行模拟。参照《建筑防水材料老化试验方法》<sup>[25]</sup>(GB/T 18244—2022),采用荧光紫外线灯进行人工老化试验,即使用 UVA-340 灯人工气候加速老化,辐照条件如表 3 所示。用防渗涂层材料拉伸试样(试样制备见 1.2 节),放入紫外老化箱中,模拟五星抽水蓄能电站工程现场的条件,启动循环和辐射模式,进行每个周期为 12 h,共 125 个周期,连续 1 500 h 的试验。总辐照时间为 1 000 h。试验完成后,需将试样取下,并在标准环境中放置 24 h,之后再行性能测试。

表 3 紫外加速老化辐照条件

循环序号	暴露周期	辐射度	黑板温度
1	8 h 干燥	340nm,0.76W/(m <sup>2</sup> ·nm)	(60±3)℃
2	4 h 凝露	关闭光源	(50±3)℃

#### 1.5 拉伸试验

为测试涂层老化后的拉伸性能,按照规定的方法制备测试试样<sup>[26]</sup>,并对试样进行测试。制备试样步骤为:①甲乙组分均匀混合后,将其分两次涂覆于模具中。第一次涂覆后在标准环境中放置 24 h,第二次涂覆后放在标准环境中养护 96 h,随后脱模再放入(40±2)℃干燥箱中烘干 48 h,取出后在标准环境中放置 4 h 以上。②用裁片机将试样裁成哑铃型 I 型试样。试样的配比按 1.3 节中进行,共制备 9 组不同配方的防渗涂层材料试样。拉伸试验速率为

250 mm/min,记录拉力  $F$ (N)和试样破坏时的总伸长  $L$ (mm),计算拉伸强度  $\sigma$  和断裂伸长率  $S$ 。按标准测试弹性恢复率<sup>[27]</sup>,拉伸至 150 mm 保持 1 h,卸下试样后平放于涂有滑石粉的平盘中,在标准环境中放置 24 h 后,测试两条标线的间距。以上试验每组试样均为五个试件。

拉伸强度  $\sigma$  计算式为:

$$\sigma = \frac{F}{l \times d} \quad (1)$$

式中: $\sigma$ 为拉伸强度,MPa,精确到0.1; $F$ 为断裂时拉力,N; $d$ 为试样厚度,mm; $l$ 为试样宽度,取6mm。

断裂伸长率  $\delta$  计算式为:

$$\delta = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $\delta$ 为断裂伸长率,%; $L$ 为断裂时标线间长度,mm; $L_0$ 为试样上初始标线间长度,取25mm。

弹性恢复率  $E$  计算式为:

$$E = \frac{L' - L_1}{L' - L_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $E$ 为弹性恢复率,%; $L'$ 为拉力机拉伸试样长度,取150mm; $L_1$ 为断裂后两标线间恢复后的长度,mm。

#### 1.6 抗渗试验

##### 1.6.1 试样制备

为测试低温条件下基材裂缝时涂层材料的抗渗性能,制备由不同宽度的裂缝基材和不同厚度的涂层材料组成的试样,制作方法①将沥青混凝土加工成直径和高度均为 40 mm 的圆柱体;②将沥青混凝土圆柱体从顶端正中切割,将其一分为二。在两半圆柱体之间镶嵌透明的有机玻璃夹条,夹条粘接在基材上,用于模拟开裂的基材。夹条的厚度为 3 mm,高度为 40 mm,宽度模拟裂缝的宽度 1 mm、4 mm、8 mm、12 mm;③将涂层材料粘结在基材试样顶面,制成试样,涂层材料的厚度分别为 2 mm、3 mm、4 mm、5 mm。如图 1 所示。



图 1 抗渗试样

### 1.6.2 测试方法

采用三轴抗渗仪测定低温下基材裂缝时涂层材料的抗渗性能。三轴抗渗仪由压力室、周围水力和渗透水压施加系统组成,激光位移传感器可记录涂层在水压力下的变形情况。在制备带裂缝的基材时,预先在裂缝空腔内部安装轻质反射片,轻质反射片采用质量极轻的铝片,其表面具有高漫反射率,以确保对激光信号的最佳反射效果。该反射片与裂缝涂层内表面垂直连接,当渗透水压使涂层向裂缝空腔鼓胀时,带动裂缝内的反射片产生同步位移。激光位移传感器置于在压力室外部,透过基材的裂缝开口对反射片进行测量。抗渗试验在低温环境下进行:先将试样预冷至 0℃,随后将其安装在透明压力室中,上下分别用透水石和试样帽密封,外裹乳胶膜并用橡皮筋紧固。压力室内充入 0℃ 冰水混合物以模拟低温环境。测试时先施加围压,再施加渗透水压,并始终保持围压高于渗透水压 10 kPa ~ 20 kPa 以防侧漏。渗透水压分两阶段施加:第一阶段为 450 kPa,第二阶段为 500 kPa,各持压 1 h。

### 1.7 界面粘结试验

采用界面拉拔方式测试涂层与混凝土的粘结强度。首先清理并干燥基材表面,涂刷不同厚度涂层(2 mm、3 mm、4 mm、5 mm),随后放入紫外老化箱进行老化。老化后使用 AB 胶将拉拔块(直径 100 mm)粘结于涂层上,固化 48 h 接着,将试样放置在万能试验机中,以 0.5 MPa/s 的速率施加负载,直到试样破坏为止。粘结强度将按照以下公式进行计算:

$$\sigma' = \frac{F'}{S} \quad (4)$$

式中: $\sigma'$  为粘结强度,MPa; $F'$  为试样被破坏时所承受的负荷,N; $S$  为涂层拉拔块横断面面积,mm<sup>2</sup>。

### 1.8 差示扫描量热测试(DSC)

采用差示扫描量热分析涂层老化前后的热性能。采用 NETZSCH DSC214 差示扫描量热仪。将试样放入试池中,温度范围为 -120℃ ~ 200℃,升温速率为 10℃/min,氮气气氛下进行等速升温试验。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 拉伸性能

基于三因素三水平正交设计得出拉伸试验结果,如图 2、图 3 所示。横坐标中这个数值代表表 2 中正交设计进行配比制备的 9 组不同配方的防渗涂层材料试样编号。对于组分 A,随着用量增加三项指标基本呈现逐渐增大趋势,表明组分 A 对材料拉

伸性能提升有正向作用,最佳水平为 19.8%;对于组分 B,随着用量增加三项指标基本呈现逐渐减小趋势,表明组分 B 对拉伸力学性能提升作用有限,最佳水平为 10%;对于组分 C,拉伸强度与断裂伸长率基本呈现逐渐增大趋势,弹性恢复率波动较小,最佳水平为 5%。

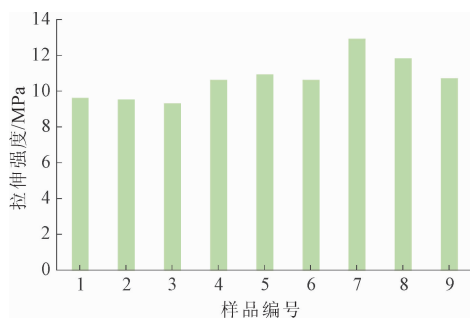


图 2 正交试验结果(拉伸强度)

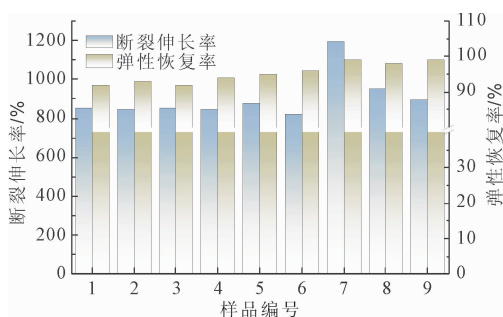


图 3 正交试验结果(断裂伸长率,弹性恢复率)

将 9 种增韧配方指标作比较,以老化前后增韧配方各指标之比的百分率,作为衡量其变化的评价指标,如图 4 所示。经紫外线老化试验后,所有抗老化增韧配方的各指标保持率均大于 50%,其中邻苯二甲酸二辛酯含量对材料韧性影响较大,第 6、7、8、9 四个配方的耐紫外线老化性能更强,其指标保持率均在 90% 以上。其中,7 号和 9 号配方表现出最优的抗老化性能,拉伸强度保持率分别为 96% 和 96%,断裂拉伸的保持率为 95% 和 96%,弹性恢复率为 98% 和 97%。

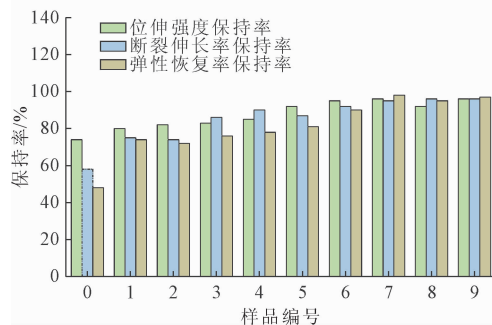


图 4 拉伸性能保持率指标

## 2.2 抗渗性能

对上述拉伸试验中拉伸性能最优配方 7 号和 9 号进行抗渗试验,结果表明,在 0℃ 低温条件下基材裂缝时,柔性涂层材料在设计渗透压力下,没有发生渗漏和撕裂情况,柔性涂层材料与沥青混凝土粘接良好,测试结束后,试样没有发生较大变形。抗渗性能测试结果如图 5 所示,可以看出,两种配方在相同涂层厚度下,涂层在水压力下的最大变形量随裂缝宽度的增加而增加。例如,7 号配方涂层厚度为 2 mm 时,裂缝宽度 1 mm 处的最大变形量为 0.05 mm,而在 12 mm 裂缝上变形量达 0.28 mm。在相同裂缝宽度下,两种配方的涂层最大变形量随涂层厚度的增加而减小。例如,9 号配方裂缝宽度为 8 mm 时,随涂层厚度增加,最大变量由形 0.21 mm 减小为 0.12 mm。这主要是因为裂缝宽度越大,涂层材料在水压力作用下需要桥接的跨度越大,其中心点所受的弯矩也越大,因此会发生更大的挠曲变形。同时,涂层厚度增加会显著提高其自身的抗弯刚度,更厚的涂层更能抵抗水压造成的弯曲变形,因此变形量更小<sup>[28-29]</sup>。表明可通过增加涂层厚度来有效控制其在宽裂缝上的变形。

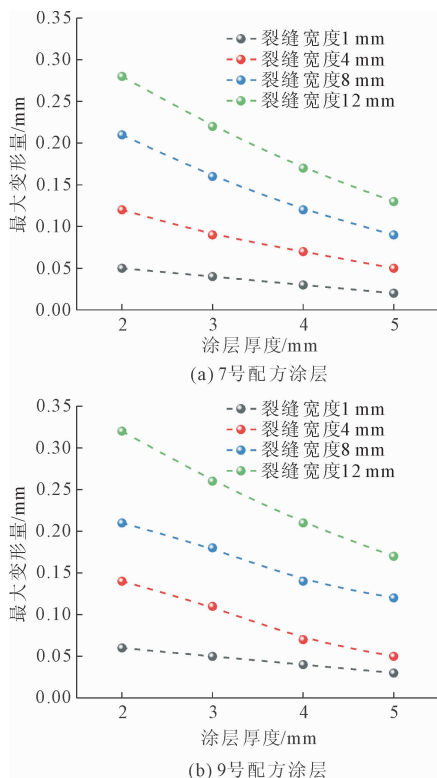


图 5 抗渗性能测试结果

对比 7 号与 9 号配方,可知 7 号配方在相同涂层厚度与裂缝宽度条件下具有更小的变形量,表明

7 号配方涂层在设计水压力作用下变形更小,抗渗性能更优。主要是由于 7 号配方中组分 C(磷酸三甲酚酯)的含量为 5%,而 9 号配方中为 3%。磷酸三甲酚酯作为一种增塑剂和稳定剂,在较高含量下可能更有效地促进了聚合物分子链间的物理缠结,并与聚氨酯硬段形成更强的相互作用,从而在微观上形成了更为致密和刚性的网络结构。这种更致密的网络结构使得 7 号配方具有更高的弹性模量(即抵抗变形的能力)。因此,在承受相同的水压力时,7 号配方涂层表现出更高的抗弯刚度,其中心点的挠度(变形量)自然小于网络结构相对疏松的 9 号配方。

## 2.3 粘结强度

图 6 为涂层粘结强度随涂层厚度的变化。由图 6 可知,粘结强度随涂层厚度的增加呈增加趋势,对于 7 号配方,涂层厚度从 2 mm 增加至 5 mm 时,粘结强度从 1.85 MPa 提升至 2.00 MPa,增幅为 8.3%。同一涂层厚度下,粘结强度排序为 7 号配方 > 9 号配方 > 基础配方,提升幅度高于 17%,表明 7 号配方界面粘结性能最优。同时,随着涂层厚度不断增大,界面失效模式由界面粘附失效转变为沥青混凝土内部的内聚失效。这是因为薄涂层拉伸时破坏更容易发生在脆弱的涂层/基材界面(粘附破坏),而对于厚涂层,其本身的内聚强度、界面粘结强度更高,当界面粘结强度大于基材内聚强度时,将发生基材内聚破坏<sup>[30-31]</sup>。本研究中,当涂层厚度达到 4 mm 和 5 mm 时,粘结强度值在约 1.95 MPa ~ 2.00 MPa 的高位。这个的强度值已经接近或超过了沥青混凝土基材本身的内聚强度(普通沥青混凝土的拉伸或粘结强度通常在 1.5 MPa ~ 2.5 MPa 范围)。当一个体系的界面粘结强度高于其中一种材料(这里是沥青混凝土)的内聚强度时,破坏不可能再发生在粘结界面,而发生在强度更低的材料内部。

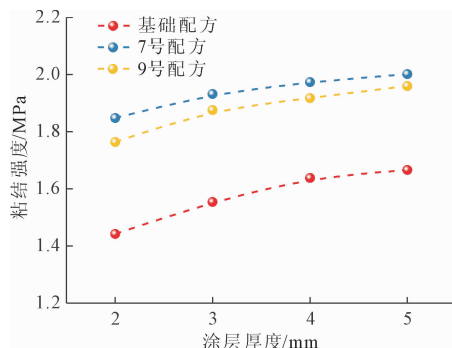


图 6 粘结强度测试结果

## 2.4 老化机理

通过老化前后涂层材料的 DSC 热性质变化分析其老化机理。图 7 为 7 号配方涂层材料老化前后 DSC 曲线。老化前 DSC 曲线显示其玻璃化转变中点温度为  $-65.43^{\circ}\text{C}$ , 并伴有  $0.609 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$  的比热变化, 表明材料具有典型的非晶态软段结构和高链段运动能力。在整个温度范围内未观察到任何结晶或熔融峰, 表明材料硬段结晶度较低, 软硬段相容性良好, 形成均匀的非晶态体系。三次升降温循环后热性能保持一致, 显示材料具有良好的热稳定性。与老化后 DSC 曲线进行对比可知, 老化后材料的玻璃化转变中点温度从  $-65.43^{\circ}\text{C}$  移至  $-64.01^{\circ}\text{C}$ , 表明分子链段运动能力下降, 比热变化由  $0.609 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$  下降为  $0.530 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ , 表明参与运动的链段比例减少, 自由体积减小。这主要是因为老化过程中发生了以交联为主的光氧化反应。紫外辐射与热氧条件促使分子链生成自由基, 自由基通过重组反应在分子链间形成新的化学交联键, 同时强化了硬段微区的氢键网络密度<sup>[32-33]</sup>。交联结构的形成显著增加了分子链的运动约束, 使链段启动运动需更高能量, 并减少了单位质量中可参与热激发的自由链段比例<sup>[34]</sup>。

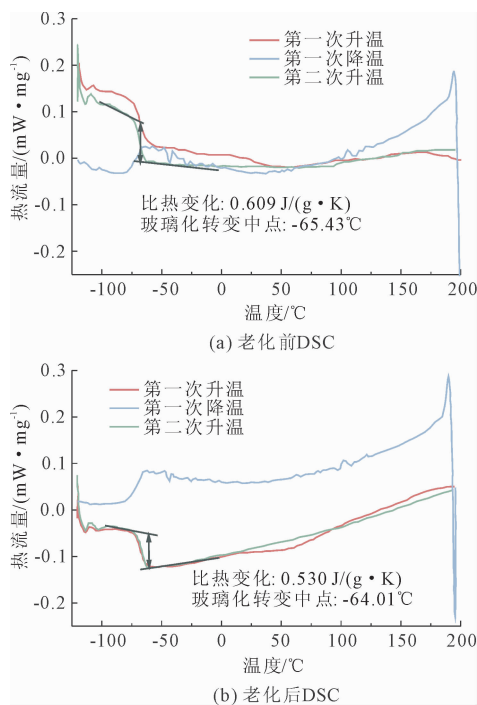


图 7 涂层 DSC 测试结果

## 3 严寒地区防渗涂层老化技术指标的确定

本项目中黑龙江伊春五星抽水蓄能电站上库盆

的沥青混凝土设计寿命为 100 年, 如何让涂层材料的工程寿命延长, 减少运行及维修成本, 需制定严寒地区沥青混凝土涂层材料紫外线老化技术指标。

室外阳光照射强度受地理位置、气候条件、海拔高度、季节等因素影响, 对涂层材料耐久性的影响也不同, 需要根据严寒地区光照条件推算涂层材料发挥功能的寿命。UVA-340 的光谱能量分布在波长  $365 \text{ nm}$  至  $295 \text{ nm}$  (太阳光截止点) 范围内, 对总辐射功率为  $1120 \text{ W}/\text{m}^2$  的阳光光谱模拟最好, 此时测得  $340 \text{ nm}$  处的辐射强度数值为  $0.68 \text{ W}/\text{m}^2$ 。

五星抽水蓄能电站坐落于黑龙江省伊春市, 黑龙江省的年太阳总辐射量介于  $4400 \sim 5028 \text{ MJ}/\text{m}^2$  (约合  $1222 \sim 1397 \text{ kWh}/\text{m}^2$ )。年平均值为  $1310 \text{ kWh}/\text{m}^2$ 。太阳平均辐射强度按下式计算为  $149.5 \text{ W}/\text{m}^2$ 。

$$E_e = \frac{H_e}{t} \quad (5)$$

式中:  $E_e$  为辐射度,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $H_e$  为累积辐射能量,  $\text{kWh}/\text{m}^2$ , 年累计辐射量为  $1310 \text{ kWh}/\text{m}^2$ ;  $t$  为累积照射时间,  $\text{h}$ , 1 年的照射时间为  $8760 \text{ h}$ 。

可以推算, 紫外线老化试验中紫外辐照在额定值为  $0.68 \text{ W}/\text{m}^2$  在  $340 \text{ nm}$  时, 总辐射功率为  $1120 \text{ W}/\text{m}^2$ , 等同于室外辐射强度 ( $149.5 \text{ W}/\text{m}^2$ ) 的 7.49 倍, 老化速率是室外的 7.49 倍。黑龙江年平均气温  $4^{\circ}\text{C} \sim 5^{\circ}\text{C}$ , 取平均温度值取  $4.5^{\circ}\text{C}$ 。根据相关经验, 材料在气温提升 1 倍的情况下, 老化速度提升 1.5 倍, 而在 UV 老化测试中设定的温度是  $60^{\circ}\text{C}$ , 老化速度比室外高 20 倍。

UV 老化测试总共持续进行  $1000 \text{ h}$ , 用下式计算得出相当于户外老化的时长为 17.12 年。

$$T_e = t_e v_1 v_2 \quad (6)$$

式中:  $T_e$  为室外老化时长, 年;  $t_e$  为紫外线老化试验时长, 年;  $v_1$  为紫外线照射相对于室外日光照射老化速率提高的倍数;  $v_2$  为紫外线老化试验中温度相对于室外温度老化速率提高的倍数。

经过  $1000 \text{ h}$  紫外线老化测试发现, 测试样品表层老化厚度只有  $0.03 \text{ mm}$ 。因此, 涂层材料的设计厚度为  $2 \text{ mm}$  时, 涂层材料的耐紫外线老化年限将超过 50 年。因此, 我国北方严寒地区紫外老化技术指标为:  $1000 \text{ h}$  紫外老化试验后, 拉伸强度保持率不小于  $85\%$ , 断裂伸长保持率不小于  $85\%$ , 弹性恢复保持率不小于  $90\%$ 。这些技术指标的确定, 基于试验数据与相关评价标的综合考量<sup>[35]</sup>。从图 4 的试验结果可知, 性能优异的配方 (如第 7、9 号) 在

1 000 h 紫外老化后,各项性能保持率均高达 90% 以上。设定 85% 的保持率门槛,是一个既能涵盖大部分优良配方,又为工程应用留出安全余量的合理值。同时,参考并严于 GB/T 19250—2013 标准的基础要求,并对关乎开裂过程中的变形协调性和耐久性的弹性恢复率提出了  $\geq 90\%$  的更高要求,以适配严寒地区抗冻胀的特殊需求。

## 4 结 论

(1) 乙组分中调整增加三种增韧剂(邻苯二甲酸二丁酯、聚醚多元醇和磷酸三甲酚酯)均能增强涂层材料老化后的拉伸性能,其中对涂层材料老化韧性影响较大的是邻苯二甲酸二丁酯的含量,三种材料的最优配比分别为 19.8%、10%、5%。

(2) 通过对低温条件下基材裂缝时新型柔性涂层材料的抗渗性能的测试,表明新型柔性涂层材料在 0℃ 低温条件下没有变硬、变脆,其与沥青混凝土粘接良好,粘接强度、拉伸强度、伸长率和弹性恢复率均满足设计渗透水压力为 500 kPa 条件下的抗渗要求。

(3) 老化使得涂层材料的玻璃化转变温度升高,比热变化减小,表明分子链段运动能力降低和自由体积减少。这主要源于光氧化交联反应,在增强材料热稳定性的同时降低了其柔性。

(4) 严寒地区防渗涂层材料 UV 老化技术指标确定为 1 000 h 紫外老化试验后,拉伸强度保持率不小于 85%,断裂伸长保持率不小于 85%,弹性恢复保持率不小于 90%。

### 参考文献:

[1] Sun Yiqing, Huang Wei, Xu Gang, et al. Experimental investigation on the performance of hydraulic asphalt concrete with varying epoxy system content [J]. Construction and Building Materials, 2025, 484:141755.

[2] Li Binqi, Li Jianbo, Yin Xunqiang. Study on the performance of polyurea anti-seepage spray coating for hydraulic structures [J]. Sustainability, 2023, 15:9863.

[3] 喻华兵. 仿生超疏水纳米材料/聚氨酯涂层的研究[D]. 太原:太原理工大学, 2014:10-15.

[4] 杨伟才,孙志恒. 高拱坝迎水面聚脲涂层防渗结构动力变形性能试验研究[J]. 水利水电技术, 2016, 47(12):100-104.

[5] Wazzrkar K, Kathalewar M, Sabnis A. High performance polyurea coatings based on cardanol[J]. Progress in Organic Coatings, 2017, 106:96-110.

[6] 余成华. 纳米纤维素基超疏水材料的制备及其应用研

究[D]. 广州:华南理工大学, 2017.

- [7] 刘 泽. 寒区高速公路混凝土护栏防腐涂层抗氯离子性能仿真研究[J]. 材料保护, 2022, 55(6):34-40.
- [8] 冯明伟. 新型双组分氟改性抗冰拔面漆的研发及应用[J]. 四川水利, 2021(2):29-35.
- [9] 王金国. 水工建筑物的破坏及防治措施研究[D]. 成都:四川大学, 2002.
- [10] 赵成先,孙红尧,罗建华,等. 寒冷环境下国内大坝混凝土的保温抗冰技术现状[J]. 水利水运工程学报, 2021(1):78-85.
- [11] 赵成先,阮新民,李红鑫. SK 单组份聚脲在北疆某水利工程表孔溢洪道混凝土表面的防护修补应用[J]. 水利水电技术, 2014, 45(6):76-78.
- [12] 李晓娜,张 昕,李同春,等. 高拱坝坝面防渗涂层数值模拟研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(5):192-199.
- [13] 刘纪亮,武庆明,宋艳艳. 高分子材料在浆砌石拱坝防渗加固中的应用[J]. 山东水利, 2022(9):29-30.
- [14] 田志高,张伯平,郭婷婷,等. 灰土强度的时间效应研究[J]. 中国农村水利水电, 2004(4):48-50.
- [15] 李炳奇,张宇弛,刘小楠,等. 伸缩缝防渗结构聚脲基涂层剥离破坏研究[J]. 水利学报, 2017, 48(1):70-77.
- [16] 李炳奇,张振宇,李 斌,等. 基于内聚力模型的高速水流聚脲基涂层剥离破坏模型研究[J]. 力学学报, 2020, 52(5):1538-1546.
- [17] 李炳奇,刘小楠,李云途. 水工结构聚脲防渗涂层的力学性能与寿命预测研究[J]. 水利学报, 2020, 51(3):268-275.
- [18] 李炳奇,周月霞,肖 俊,等. 反向压力伸缩缝新型聚脲基复合防渗体系研究[J]. 水利学报, 2015, 46(12):1479-1486.
- [19] 刘小楠,李炳奇,冯明伟,等. 适应高寒坝面防护聚脲基聚合物研究及工程应用[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(8):27-37.
- [20] 孙丛涛,康莉萍,赵 霞,等. 混凝土涂层的抗渗性能[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(5):1378-1384.
- [21] 齐 孟,蒲云东,杨 森,等. 氧化石墨烯对水泥基渗透结晶型防水材料抗渗性能的影响[J]. 复合材料学报, 2023, 40(3):1598-1610.
- [22] 来晓鹏,王元战,王禹迟,等. TA/SiO<sub>2</sub> 疏水涂层及其对混凝土抗侵蚀性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(1):30-36.
- [23] 张飞凡,裴万胜,张熙胤,等. 超疏水涂层的制备及在寒区混凝土中的应用研究综述[J]. 材料导报, 2023, 37(S2):196-207.

影响,随着土体中含水率升高,其相对介电常数增大。

(2) 土石坝中水对土体的潜蚀破坏过程由表及里,对应的 GPR 回波呈现双曲线特征,且溶蚀破坏的腔体半径并不影响回波双曲线的张开度。

(3) 水体通过防渗层进入坝体,并对坝体中的填筑黄土造成侵蚀,且该侵蚀具有上蚀发展的趋势。

### 参考文献:

- [1] 施从伟,高忠斌.粗糙表面对煤岩界面探地雷达识别结果影响研究[J].煤炭工程,2024,56(11):176-181.
- [2] 朱四新,王浩蒨,朱安福,等.非金属管线不同参数对探地雷达响应的影响[J].科学技术与工程,2024,24(31):13540-13552.
- [3] 安娅菲,冯 晷,董泽君,等.砂岩体裂隙渗流区的探地雷达信号动态响应机制[J].重庆大学学报,2024,47(10):181-190.
- [4] 范永亮,郭士礼,梁 栋,等.探地雷达早期信号探测深度数值研究与应用[J].地球物理学进展,2024,39(5):2069-2077.
- [5] 张浚丰,许 明,刘先珊,等.浆砌石挡墙非均匀数值模拟和电磁响应特征研究[J].地球物理学进展,2024,39(6):2393-2406.
- [6] 刘 震,顾兴宇,李 骏,等.探地雷达数值模拟与道

路裂缝图像检测的深度学习增强方法[J].地球物理学报,2024,67(6):2455-2471.

- [7] 郭士礼,蔡文才,田朋飞,等.沥青面层松散探地雷达波场响应特征研究[J].地球物理学进展,2024,39(4):1620-1627.
- [8] 谭 磊,彭 渊,张平松,等.土石坝蚁巢地球物理探测技术现状及展望[J/OL].水利水电科技进展,1-19 [2025-02-28]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1439.TV.20240319.1347.003>.
- [9] 赵丽娜,霍吉祥,俞扬峰,等.郑州“7·20”特大暴雨后常庄水库主坝综合物探分析[J].人民黄河,2022,44(11):152-155.
- [10] 陈国光,李 卓,方艺翔,等.监测资料与探地雷达在均质土坝渗漏分析中的应用[J].人民黄河,2022,44(10):127-132,158.
- [11] 方艺翔,李 卓,范光亚,等.监测资料、压水试验与综合物探法在某心墙坝渗漏识别中的应用研究[J].水利水电技术(中英文),2022,53(2):87-97.
- [12] 宋 洋,杨 杰,程 琳,等.探地雷达在堆石坝组合防渗体检测中的应用研究[J].西安理工大学学报,2021,37(2):229-234.
- [13] 熊 辉,周君蔚.基于 BIM 技术的混凝土面板堆石坝脱空检测与加固[J].水电能源科学,2020,38(12):83-86.

(上接第 136 页)

- [24] 胡佳雯,何武全,裴文武,等.寒区渠道接缝材料老化性能及技术指标研究[J].水利与建筑工程学报,2025,23(1):185-191.
- [25] 建筑防水材料老化试验方法:GB/T 18244—2022 [S].中国标准出版社,2022.
- [26] 建筑防水涂料试验方法:GB/T 16777—2008 [S].北京:中国标准出版社,2008.
- [27] 铁路工程喷膜防水材料:Q/CR 517.2—2016 [S].北京:中国铁道出版社,2016.
- [28] 王樱峻,宁志远,叶 谦.沥青混凝土面板与土工膜防渗连接结构试验研究[J].水电能源科学,2023,41(8):113-116.
- [29] 张志恩,雷 军,李利平,等.隧道衬砌施工缝抗渗性及影响因素室内试验研究[J].隧道建设(中英文),2024,44(8):1609-1616.
- [30] 蒋雅君,赵菊梅,刘基泰.含聚合物防水膜的隧道衬砌界面剪切-滑移力学特性试验研究[J].隧道建设(中英文),2024,44(3):496-505.
- [31] 陆新征,叶列平,滕锦光,等.FRP-混凝土界面粘结滑移本构模型[J].建筑结构学报,2005,26(4):10-18.
- [32] 蔡光义.聚氨酯涂层的老化机制及改性与失效评价方法研究[D].武汉:华中科技大学,2019.
- [33] 朱广超,王贵友,胡春圃.交联密度对脂肪族聚氨酯弹性体结构与性能的影响[J].高分子学报,2011(3):274-280.
- [34] 肖 欢.热塑性聚氨酯弹性体增韧聚氯乙烯的研究[D].西安:西安科技大学,2025:45-57.
- [35] 聚氨酯防水涂料:GB/T 19250—2013 [S].北京:中国标准出版社,2013.