

高分子柔性辅助防渗防护材料的耐高/低温性能研究

张鹏¹, 贾志刚¹, 王泳丹², 胡宇杰²

(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: 黑龙江伊春五星抽水蓄能电站是目前全国冬季温度最低的抽水蓄能电站, 为保证其上库盆沥青混凝土的辅助防渗涂层材料在极端温度下仍能正常发挥效用, 需对其耐高/低温性能进行研究。基于此, 采用耐高温试验、耐低温试验、耐高低温试验以及差热扫描试验, 通过与常见防渗涂层材料沥青玛蹄脂对比, 对柔性防渗材料耐温性能进行评价。结果表明: 在不大于150℃的高温环境下, 柔性防渗涂层材料拉伸性能良好、有弹性、有韧性。在低温-50℃下, 柔性涂层材料与沥青混凝土基材粘结牢固, 界面破坏模式为基材内聚破坏, 建议涂层厚度在3 mm。经高低温疲劳循环后, 柔性防渗涂层材料拉伸性能衰减缓慢, 具有良好稳定性。沥青玛蹄脂试样高温下易软化, 低温下硬化脆裂。老化后柔性涂层材料的玻璃化温度上升, 比热变化下降, 其耐低温性远优于沥青玛蹄脂。总体而言, 相比于沥青玛蹄脂, 柔性防渗材料具有优异的耐高温和低温性能。

关键词: 防渗防护涂层材料; 高温性能; 低温性能; 玻璃化温度; 沥青玛蹄脂

中图分类号: TV441

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)02-0146-06

Weather Resistance of Polymer Flexible Auxiliary Impermeable Protective Materials

ZHANG Peng¹, JIA Zhigang¹, WANG Yongdan², HU Yujie²

(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: The Wuxing Pumped Storage Power Station in Yichun, Heilongjiang Province, is currently the pumped storage power station with the lowest winter temperature in China. To ensure that the auxiliary anti-seepage coating material for the asphalt concrete in the upper reservoir basin remains functional under extreme temperature, a study of weather durability is essential. Accordingly, high-temperature durability test, low-temperature durability test, high-low temperature cycling test, and differential scanning calorimetry (DSC) were conducted. The weather durability of the flexible anti-seepage material was evaluated through comparison with asphalt mastic, a common anti-seepage coating material. The results indicate that under temperatures of 150℃, the flexible anti-seepage coating material exhibited good tensile performance, elasticity, and toughness. At a low temperature of -50℃, the flexible coating material remained firmly bonded to the asphalt concrete substrate, with the failure mode being cohesive failure within the substrate and a coating thickness of 3 mm is recommended. After high-low temperature fatigue cycling, the tensile performance of the flexible anti-seepage coating material degraded slowly, demonstrating good stability. In contrast, asphalt mastic samples were prone to softening at high temperatures and hardening at low temperatures. After aging, the glass transition temperature of the flexible coating material increased, and the specific heat capacity decreased, indicating its low-temperature durability is far superior to that of asphalt mastic. Overall, compared to asphalt mastic, the flexible anti-seepage material possesses excellent weather durability.

Keywords: waterproof protective coating material; high-temperature performance; low-temperature performance; glass transition temperature; asphalt mastic

收稿日期: 2025-11-15

修稿日期: 2025-12-21

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2025JC-YBQN-537)

作者简介: 张鹏(1986—), 男, 高级工程师, 主要从事水工结构等方面工作。E-mail: zhangpenghkl@163.com

通讯作者: 贾志刚(1980—), 男, 高级工程师, 主要从事水工结构等方面工作。E-mail: 13636312@qq.com

本研究依托黑龙江伊春五星抽水蓄能电站上水库沥青混凝土全库盆防渗工程,其最低气温已达到 -47.1°C ,是目前全国已建和在建工程中气温最低的。极端低温对上水库沥青混凝土面板的耐温性等提出了更高的要求^[1-4]。在沥青混凝土面板表面涂刷高分子强耐候柔性辅助防渗防护材料(以下简称涂层材料),是目前工程中保障面板在极端温度下能够正常服役的常用措施之一^[5-7]。一般来说,涂层材料表面暴露于空气中,直接经受太阳光照射,最先受外部环境高低温度影响^[8-9]。对涂层材料的耐高低温性能进行试验和研究,对评判极寒地区高分子涂层材料的适用性、降低工程运行维护成本有着重要意义^[10-12]。

王媛怡等^[13]、汪在芹等^[14]分析了当前混凝土用防渗涂层,认为未来应更多关注涂层的耐候性。刘小楠等^[15]借助冻融循环试验研究了防渗涂层的耐久性,结果表明,脲基聚合物涂层具有优良的抗冻融循环能力。孔乙庭等^[16]制备了新型单组份聚氨酯涂层,并测试了其低温性能,发现在零下 35°C 时涂层未出现裂纹,表现出良好的低温柔性。李珍等^[17]以聚氨酯材料为基体,开发出兼具抗渗性能与粘结性能的新型防护涂层。

综上所述,围绕防渗涂层的耐候性、低温适应性及材料开发的现有研究已取得一定进展。然而,面对伊春五星抽蓄电站的极端低温环境,对于涂层材料需具备的耐温性及温度变化下的稳定性尚待研究。本文基于实际工程需求,采用耐高温试验、耐低温试验、耐高低温试验以及差热扫描试验对防渗材料耐候性能进行评价,分析涂层材料在严苛环境下的耐候性能与长期服役能力,该研究可为极寒地区抽水蓄能电站沥青混凝土防渗防护涂层的选型与应用提供参考。

1 原料与配方

1.1 柔性涂层材料

采用甲、乙双组分,如下表 1 所示。甲组分由聚己二酸新戊二醇-1,6-己二醇酯二醇、氢化蓖麻油聚醚多元醇、聚四氢呋喃二醇、聚醚多元醇、一缩二丙二醇、甲基丙二醇、苯二亚甲基二异氰酸酯、二环己基甲烷二异氰酸酯等原料制成的聚氨酯预聚体组成。乙组分原材料为聚氧化丙烯二醇、聚醚多元醇、乙二醇二苯甲酸酯、甲基磷酸二甲酯、轻质碳酸钙、三乙醇胺及二正辛胺。合成工艺与前期研究相同^[18]。制备样品时按照甲组分:乙组分(质量比)=

1:2 进行混合,搅拌均匀后即可一次或多次涂覆于基材表面至一定厚度(建议 $3\sim 5\text{ mm}$),达到密封、防渗、隔离等作用。

表 1 涂料配方

组分	序号	原料名称	生产厂家	质量百分比/%
甲	1	聚己二酸新戊二醇-1,6-己二醇酯二醇	蓝星东大	10
	2	氢化蓖麻油聚醚多元醇	济宁利多化工有限公司	12
	3	聚四氢呋喃二醇	韩国 SK	12
	4	聚醚多元醇	蓝星东大	15
	5	一缩二丙二醇	韩国 SK	10
	6	甲基丙二醇	台湾大连	13
	7	苯二亚甲基二异氰酸酯	盼得(上海国际贸易有限公司)	12
	8	二环己基甲烷二异氰酸酯	济宁利多化工有限公司	16
乙	1	聚氧化丙烯二醇	蓝星东大	18
	2	聚醚多元醇	蓝星东大	12
	3	乙二醇二苯甲酸酯	广州市奇晟贸易有限公司	20
	4	甲基磷酸二甲酯	东莞市辰威新材料科技有限公司	6
	5	轻质碳酸钙	灵寿县嘉硕建材加工有限公司	39.6
	6	三乙醇胺	吉化	4
	7	二正辛胺	上海高鸣化工有限公司	0.4

1.2 沥青玛蹄脂

将沥青样品加热到 160°C 至液体状态,同时,将矿粉加热至 160°C 脱水。将沥青与矿粉按照质量比 $3:7$ 混合搅拌均匀,制成沥青玛蹄脂样品。采用 70 号道路石油沥青,矿粉为石灰石粉,细度通过 0.075 mm 筛孔 $\geq 85\%$,含水率 $\leq 0.5\%$ 。

2 性能试验

2.1 耐高温试验

将试样放入烘箱中加热至 $80\sim 150^{\circ}\text{C}$,每升 10°C 观察试样,判断试样是否产生变形或流淌现象,试样是否有较好的弹性和韧性,同时进行拉伸测试。按照规范制备并测试试样^[19]。拉伸试验速率为 250 mm/min ,记录试样破坏时的拉力 $F(\text{N})$ 与总伸长量 $L(\text{mm})$,计算拉伸强度 σ 与断裂伸长率 δ 。按照标准方法测试弹性恢复率^[20],将试样拉伸至 150 mm 保持 1 h ,卸下试样后平放在涂有滑石粉的平盘中,在标准环境下放置 24 h 后,测试标线间的距离。

以上试验每组试样均为 5 个试件。

拉伸强度 σ 计算式为:

$$\sigma = \frac{F}{6d} \quad (1)$$

式中: σ 为拉伸强度,MPa,精确到 0.1 MPa; F 为断裂时拉力,N; d 为试样厚度,mm。

断裂伸长率 δ 计算式为:

$$\delta = \frac{L - 25}{25} \times 100\% \quad (2)$$

式中: δ 为断裂伸长率,%; L 为断裂时标线间距离,mm。

弹性恢复率 E 计算式为:

$$E = \frac{150 - L_1}{150 - 25} \times 100\% \quad (3)$$

式中: E 为弹性恢复率,%; L_1 为标线间恢复后的距离,mm。

2.2 耐低温试验

耐低温试验是在低温下测试柔性涂层材料与沥青玛蹄脂的拉伸性能与界面粘结性能。进行拉伸试验时,首先制备拉伸试验试样,再按照设置的温度(10 ~ -85℃)分别放于低温冰柜和超低温冰箱中,冷冻 8 h 后立即检验其低温柔性,即将试样在相应温度下对折,检测其性状为脆性还是柔性,同时进行拉伸试验,测试指标与 2.1 节相同。进行界面粘结试验时,首先制备界面粘结试样,即清理并干燥基材表面,涂刷 3 mm 厚度涂层,再使用 A、B 胶将拉拔块(直径 100 mm)粘结于涂层上,固化 48 h。随后放入放于低温冰柜中冷冻 8 h。最后将试样置于万能试验机,以 0.5 MPa/s 的速率加载直至破坏。

粘结强度计算如下:

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

式中: σ' 为粘结强度,MPa; F' 为界面破坏时的最大荷载,N; S 为涂层拉拔界面的横截面积,mm²。

2.3 耐高低温试验

耐高低温试验是在高低温疲劳循环后对柔性涂层材料与沥青玛蹄脂拉伸性能进行测试。首先,将拉伸试样放于 80℃ 烘箱中 4 h,随后取出放于 -50℃ 低温冰柜中 4 h,此为 1 个循环。每次循环完,进行拉伸试验并记录其表面完整度,若试样完好,则进入下一个循环,共进行 200 次循环。制样时,柔性涂层材料可直接进行高低温循环,沥青玛蹄脂由于在高温下会软化,因此先将其置于老化盘中进行高低温循环,循环之后在进行拉伸试样制备与测试。

2.4 DSC 测试

采用 NETZSCH DSC 214 差示扫描量热仪,取样品置于样品池中,在升温速率为 10℃/min,氮气氛围,温度为 -120 ~ 200℃ 的条件下进行等速升温测试。

3 试验结果与分析

3.1 耐高温性能

防渗材料的耐高温性能如图 1 所示。在不大于 150℃ 的环境下,防渗涂层材料的拉伸强度随温度升高而略微减小,材料无变形、无流淌、有弹性、有韧性。由于下层沥青混凝土基材耐高温不能超过 80℃,故以上涂层材料高温试验证明:表层涂层材料耐高温性能远高于下层沥青混凝土基材。沥青玛蹄脂在此温度范围内发生软化,拉伸强度几近于零,难以使用。

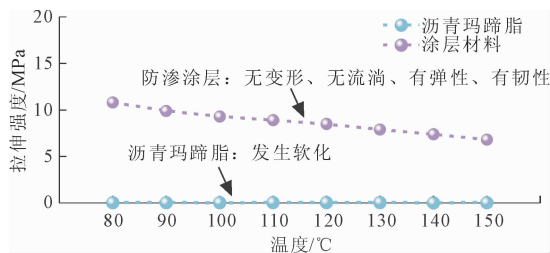


图 1 耐高温性能

3.2 耐低温性能

3.2.1 低温拉伸性能

如图 2 所示,随着温度从 10℃ 降至 -85℃,两种材料的拉伸强度均呈现上升趋势。柔性涂层材料的强度始终显著高于沥青玛蹄脂。柔性涂层材料作为高性能弹性体,其强度来源于分子链韧性和稳定的交联网络,因此变化平稳。而沥青玛蹄脂作为热塑性材料,低温下强度的急剧增长主要源于沥青的硬化和脆化^[21-23]。

两种材料的断裂伸长率均随温度下降而降低,但表现出显著差异。柔性涂层材料的断裂伸长率从 1 651% 降至 582%,即便在 -85℃ 的极端低温下,仍保持了极高的延展性,这是其具备优良低温柔性的直接证据。相比之下,沥青玛蹄脂的断裂伸长率从 169% 骤降至仅 5%,表明其在低温下已彻底脆化,完全丧失了变形能力。

弹性恢复率的变化进一步印证了上述结果,柔性涂层材料的弹性恢复率在整个宽温域(10 ~ -85℃)内稳定在 74% ~ 80% 之间,这表明其交联网络结构在低温下仍能有效回弹,宏观上表现为柔韧、不易永久变形。而沥青玛蹄脂的弹性恢复率则从 78% 断

崖式下跌至 28%,其恢复能力在低温下基本丧失。

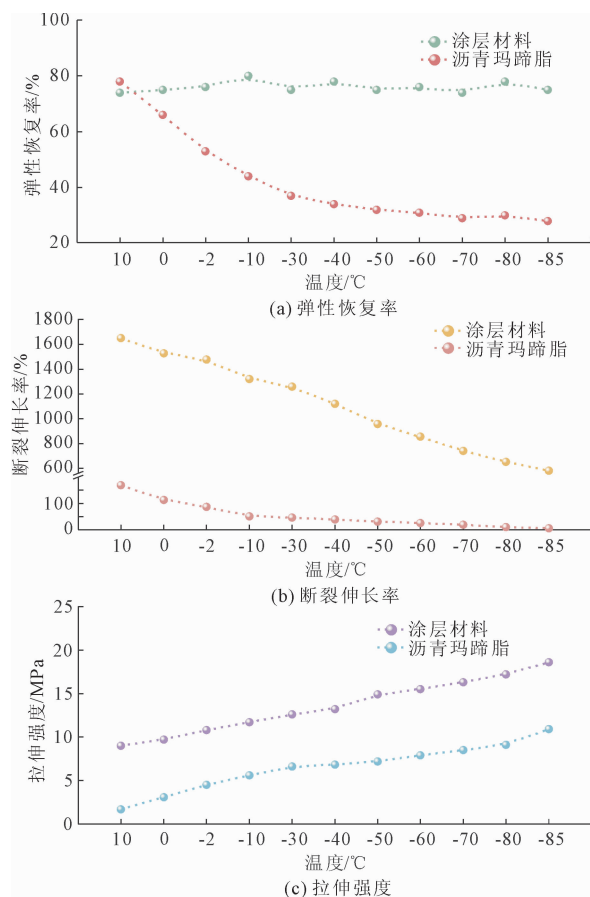


图 2 防渗材料与沥青玛蹄脂的低温拉伸性能

上述力学性能的差异,直接决定了二者宏观柔性的不同。同时,试验观察发现,柔性涂层材料在 -85°C 及以上温度范围内,均表现出良好的柔性,试样可对折而不断裂,这与其在整个低温区间内保持的高断裂伸长率($>580\%$)和高弹性恢复率($>74\%$)高度一致。相反,沥青玛蹄脂仅在 -30°C 以上具有柔性(对折不断),当温度低于 -30°C 时,其断裂伸长率已降至极低水平($<10\%$),导致其在拉伸或弯折时极易发生脆性断裂。

3.2.2 低温粘结性能

低温温度下涂层材料与沥青混凝土基材粘结性能如图 3 所示。防渗涂层材料粘结强度随温度降低而增大,在 -50°C 下,涂层材料与沥青混凝土表面仍粘接牢固,破坏模式均为沥青混凝土基材内聚破坏,涂层材料将沥青混凝土中的沥青和细骨料部分粘住,从沥青混凝土基材中剥离,涂层材料涂层不起皮,不开裂,本身无任何变化。对于沥青玛蹄脂样品,粘结强度同样随温度降低而增大,当温度在 $0\sim-10^{\circ}\text{C}$ 范围时,沥青玛蹄脂与沥青混凝土粘结紧固,破坏模式均为沥青玛蹄脂内聚破坏,当温度低于

-30°C 时,沥青玛蹄脂易发生脆断,无法进行界面拉拔试验。但在实际工程中^[24],沥青混凝土表面具有粗糙度,中砂粒径在 2 mm 以上,建议涂层厚度要能将突出的砂砾与凹陷填平包裹,厚度在 $3\sim 5\text{ mm}$ 均。考虑工程造价,建议涂层厚度在 3 mm 较为合适。

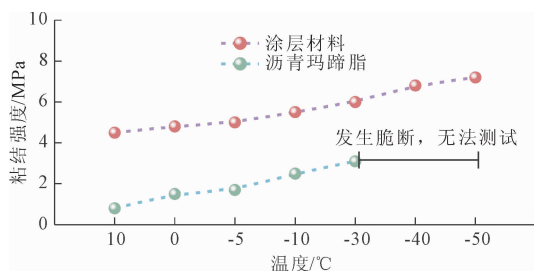


图 3 低温粘结性能

3.3 高低温疲劳性能

经过 200 次高低温循环后,两种材料的性能演变呈现出显著差异,如图 4 所示。在拉伸强度方面,柔性涂层材料表现出良好的稳定性。其拉伸强度由初始的 9.0 MPa (循环 0 次)略微下降至 8.1 MPa (循环 200 次),总体衰减率为 10% 。该性能曲线在整个循环过程中波动较小,表明其分子主链和交联网络在热疲劳应力下保持了高度的结构完整性。沥青玛蹄脂的拉伸强度呈现急剧的劣化趋势,从初始的 1.7 MPa 大幅下降至 0.1 MPa ,衰减幅度高达 94.1% 。这表明沥青玛蹄脂在冷热循环过程中发生了严重的热氧老化,导致其承载能力基本丧失。

在断裂伸长率指标上,柔性涂层材料的初始断裂伸长率极高(1651%),在经过 200 次循环后缓慢下降至 1403% ,降幅为 15.02% 。这说明其高分子网络仅发生了轻微的分子链降解,依然能承受巨大的塑性变形。而沥青玛蹄脂本身初始延展性就较低(169%),在经历循环后便急剧下降并迅速趋近于零,最终完全脆化。这种截然不同的演变规律揭示了两者的本质区别:柔性涂层材料依靠其稳定的化学交联结构维持延展性,而沥青玛蹄脂在“软化-硬化”的反复过程中,因氧化脆化和内部微裂纹的萌生与扩展,导致其在极小应变下即发生脆性断裂^[25-26]。

在弹性恢复率上,柔性涂层材料的弹性恢复率曲线变化相对平缓,从初始的 74% 下降至 55% ,降幅为 25.7% ,证明其交联网络在经历热应力后仍能有效地使分子链回弹,保持了良好的粘弹性。反观沥青玛蹄脂,其弹性恢复率随循环次数增加呈现持续且显著的下降趋势,从 72% 下降至 31.5% ,降幅

达 56.2%。这表明其在反复的温度应力下积累了不可逆的塑性变形,同时高温加速了轻组分的挥发与氧化反应,致使其粘弹性本质丧失,恢复能力严重劣化^[27]。

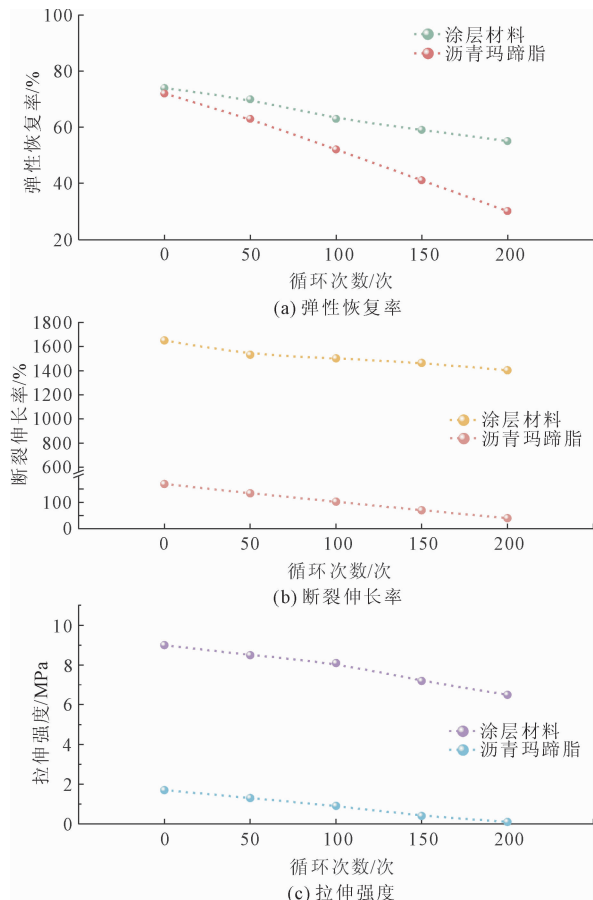


图 4 高低温下拉伸性能

3.4 耐候机理

通过分析柔性涂层材料与沥青玛蹄脂 DSC 热性质老化前后变化进一步揭示其耐候性机理。涂层材料 DSC 结果如图 5 所示。涂层材料 T_g 拐点温度由老化前的 -66.82°C 上升为 -64.88°C , 拐点温度发生一定程度提升, 比热变化由 $0.513 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ 下降为 $0.490 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ 。这是由于紫外老化导致分子链断裂, 同时伴随氧化反应, 导致自由基生成。这些自由基可能引发分子间交联反应, 形成新的化学键, 限制链段运动, 使得 T_g 升高^[28-30]。

沥青玛蹄脂测试结果如图 6 所示, T_g 拐点温度由老化前的 -42.62°C 上升为 -39.51°C , 拐点温度发生一定程度提升, 比热变化由 $0.040 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ 下降为 $0.039 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ 。这是因为老化后沥青中芳香分、胶质等活性组分, 引发自由基链反应, 生成羰基、亚砷基等含氧基团, 促进分子间交联, 限制了分

子链运动, 降低了分子振动自由度, 使得 T_g 升高, 单位质量储热能力减弱^[31-33]。

二者对比知, 柔性涂层材料玻璃化转变温度 (T_g) 远低于沥青玛蹄脂, 表明前者分子链的冻结温度低于后者, 宏观表现为柔性涂层材料能够在更低的温度下仍具有较好的力学性能、形变能力等, 具有优异的耐低温性能^[34-35]。两者在高温区热流量的下降 (即比热容降低) 现象相似, 但机理迥异。柔性涂层材料主要源于物理结构的致密化, 即老化引发的二次交联限制了链段运动, 减少了体系中的“自由体积”。而材料吸收热量 (热流) 的本质是分子链段、链节等运动单元被激活。当链段运动被更紧密的网络所束缚时, 单位质量的物质升高单位温度所需吸收的热量就会降低^[36]。而沥青玛蹄脂则源于化学组分的质变, 即轻组分挥发与氧化聚合导致体系刚性增强, 分子振动自由度降低, 从而导致其储热能力下降, 使其从粘弹性体转向脆性固体。

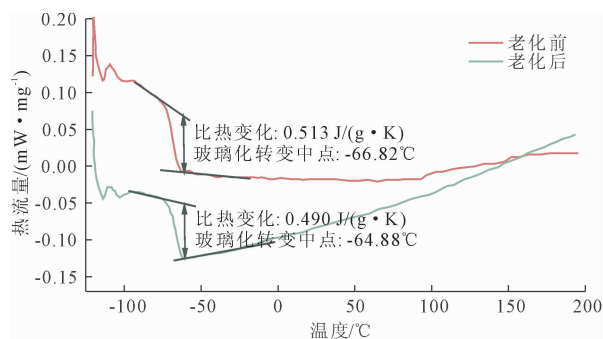


图 5 涂层材料老化前后 DSC 曲线

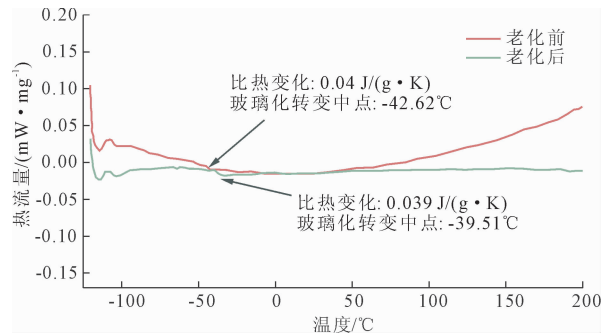


图 6 沥青玛蹄脂老化前后 DSC 曲线

4 结论

(1) 在不大于 150°C 的高温环境下, 柔性涂层材料无变形、有弹性、有韧性, 拉伸性能稳定, 沥青玛蹄脂在此温度范围内发生软化流动, 无法使用。

(2) 在 -50°C 下, 涂层材料与沥青混凝土表面仍粘接牢固, 对粘接面进行剥离拉伸, 破坏面均在沥

青混凝土部分。建议涂层厚度在 3 mm 较为合适。对于沥青玛蹄脂样品,当温度在 0℃ 附近时,沥青玛蹄脂与沥青混凝土粘结紧密,可从沥青玛蹄脂部分拉离,当温度低于 -30℃ 时,沥青玛蹄脂发生脆断,无法剥离。

(3) 柔性涂层材料耐低温性能优异,在低温 -85℃ 以上,均具有柔性,对折不断,随着温度下降其拉伸强度而增大,断裂伸长率下降,弹性恢复率变化不明显。沥青玛蹄脂在低温 -30℃ 以上时,具有柔性,对折不断,温度低于 -30℃ 时,拉伸时极易脆断。

(4) 柔性涂层材料玻璃化温度远低于沥青玛蹄脂,表明其在低温下具有较好的力学性能、形变能力,其老化后的玻璃化温度上升,比热变化下降。

(5) 本研究明确了所研制柔性涂层在极端环境下的性能优势:其在 -85℃ 极低温下仍能保持断裂伸长率 >580%,弹性恢复率 >74%,并在 -50℃ 下能与沥青混凝土基材产生牢固的内聚破坏式粘结;同时,经 200 次高低温循环后,其拉伸强度仅衰减约 5%,展现出远优于传统沥青玛蹄脂的耐疲劳稳定性,为该材料在极端温差地区工程的长期安全服役提供了关键的数据支撑与实践依据。

参考文献:

[1] 何武全,姚 彬,吴 迪,等. 新中国渠道防渗工程技术发展历程与展望[J]. 中国农村水利水电, 2024(12):241-247.

[2] 王樱峻,王登银,赵 琳. 水库运行期沥青混凝土面板封闭层老化及治理对策研究[J]. 水力发电, 2021, 47(5):77-82.

[3] 徐小东,汪正兴,朱安龙,等. 环境因素对水库大坝沥青混凝土面板温度的影响分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2023, 21(4):15-20.

[4] 潘华明,贾晨芳. 高寒地区沥青混凝土防渗面板施工技术研究与实践[J]. 技术与市场, 2014, 21(9):22-24.

[5] 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.

[6] Fu Han, Cai Junrui, Xu Zengguang, et al. Research on material selection and low-temperature anti-cracking mechanism of hydraulic asphalt concrete panels in the alpine region [J]. Construction and Building Materials, 2024, 423:135830.

[7] 高燕芳,牛 栋. 混凝土面板防渗及抗冻害处理技术的应用[J]. 山西水利科技, 2009(1):35-36.

[8] 许晓璐,李玉霖. 混凝土大坝表面保护聚氨酯泡沫涂

层材料[J]. 新型建筑材料, 2012, 39(10):69-71.

[9] 许晓璐,李玉霖,李素莲. 贵州水库坝体表面应用聚氨酯涂层的可行性分析[J]. 化工新型材料, 2012, 40(4):135-137.

[10] 万 贇,孙德文,刘玉亭,等. 单组份聚氨酯防水涂料性能研究及在猴子岩水电站的应用[J]. 水利水电技术, 2017, 48(5):155-158.

[11] 杨 晨,罗建华,任银霞,等. 全水发泡聚氨酯保温材料制备及其在混凝土坝的防护应用研究[J]. 中国胶粘剂, 2022, 31(8):32-38.

[12] 孟庆宇. 水工混凝土涂聚氨酯涂层的抗冻性能研究[J]. 黑龙江水利科技, 2022, 50(12):5-7.

[13] 王媛怡,陈 亮,汪在芹. 水工混凝土大坝表面防护涂层材料研究进展[J]. 材料导报, 2016, 30(9):81-86.

[14] 汪在芹,冯 菁,梁 慧,等. 水工混凝土表面防护保温涂层的制备与性能研究[J]. 水力发电, 2017, 43(3):128-131.

[15] 刘小楠,李炳奇,冯明伟,等. 适应高寒坝面防护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.

[16] 孙乙庭,孟 昕,李永林,等. 新型单组分喷涂聚氨酯对改进蓄水大坝工程止水性的试验研究[J]. 世界地质, 2024, 43(1):136-142.

[17] 李 珍,冯 菁,韩 炜,等. 水工建筑物混凝土新型防护材料研究与应用[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(10):140-147.

[18] 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.

[19] GB/T 16777—2008 建筑防水涂料试验方法[S]. 北京:中国标准出版社, 2008:7-8.

[20] Q/CR 517.2—2016 铁路工程喷膜防水材料第 2 部分:喷涂橡胶沥青[S]. 北京:中国铁路总公司企业标准, 2016:3-8.

[21] 宋振丰,郑传峰,魏智强,等. 基质沥青组分对其脆化及流变特性的影响效应分析[J]. 公路工程, 2025, 50(1):181-185.

[22] 聂忆华,孙世恒,丁海波,等. 沥青胶结料低温物理硬化及结晶动力学分析[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(4):683-688, 694.

[23] 张红日. 沥青路面预防性养护技术对比与分析[J]. 山西交通科技, 2023(5):33-37.

[24] 王 宇,龙 勇,彭 颇,等. 混凝土性能及模板工艺对外观质量的影响[J]. 铁道建筑, 2025, 65(6):180-186.

[25] 路鹏程,祖浩轩,安俊龙,等. 聚氨酯弹性体在不同环境条件下的老化性能[J]. 复合材料学报, 2025, 42(5):2557-2566.