

# 冻融屋面SBS沥青-保温层界面剥离研究

史丽丽

广州航海学院, 中国·广东 广州 510725

**摘要:** 屋面系统在寒冷及季节性冻融地区, 频繁经历冻融循环并严重影响材料界面粘结性能, SBS改性沥青因其优良的弹性和耐温性被广泛应用于屋面防水系统。为探明SBS沥青与保温层界面在冻融作用下的剥离机制, 本文开展多轮冻融循环模拟试验, 分析不同保温材料及界面处理方式下的粘结性能变化, 结合界面剥离力测试结果揭示冻融循环对界面完整性和破坏模式的影响。研究表明冻融循环导致界面粘结强度明显下降, 剥离破坏多集中于界面弱结合区域, 本研究为寒冷地区屋面系统结构设计与材料选型提供理论支持和实践参考。

**关键词:** 冻融循环; SBS改性沥青; 界面剥离; 保温层

## Study on the Delamination of SBS Asphalt-Insulation Interface in Freeze-Thaw Roofs

Shi Lili

Guangzhou Maritime University, China Guangdong Guangzhou 510725

**Abstract:** In cold and seasonal freeze-thaw regions, roofing systems frequently undergo freeze-thaw cycles, which severely impact the bonding performance at material interfaces. SBS-modified asphalt is widely used in roofing waterproofing systems due to its excellent elasticity and temperature resistance. To investigate the debonding mechanism between SBS asphalt and insulation layers under freeze-thaw conditions, this study conducted multiple freeze-thaw cycle simulation tests, analyzing the changes in bonding performance under different insulation materials and interface treatment methods. Combined with interface peel force test results, the influence of freeze-thaw cycles on interface integrity and failure modes was revealed. The findings indicate that freeze-thaw cycles significantly reduce interface bonding strength, with debonding damage primarily concentrated in weak bonding areas. This research provides theoretical support and practical references for the structural design and material selection of roofing systems in cold regions.

**Keywords:** Freeze-thaw cycle; SBS-modified asphalt; Interfacial delamination; Insulation layer

## 0 引言

寒冷和高原地区建筑屋面频繁经历冻融交替, 致使材料界面结构反复受损成为防水失效和热能散失的主要诱因, SBS改性沥青作为弹性优良的防水材料, 在复杂气候条件下具有较强的适应性, 但其与保温层之间的界面结合状况在多次冻融过程中容易发生退化, 直接影响屋面系统的整体耐久性与安全性能。目前对于冻融作用下SBS沥青与多种保温材料界面的剥离行为缺乏系统性研究, 尚需明确其粘结机制与破坏模式及影响因素, 为优化材料界面处理工艺及提高屋面结构抗冻稳定性提供基础支撑, 该研究以冻融循环环境为背景, 聚焦界面剥离性能变化并揭示其退化规律, 为严寒地区建筑屋面设计与维护提供重要技术依据。

## 1 冻融作用下的屋面结构变化

### 1.1 冻融循环的物理机制

冻融循环是指材料在温度变化作用下反复经历水分冻

结和融化的过程。在屋面结构中, 当水分进入材料孔隙后, 温度降至 $0^{\circ}\text{C}$ 以下, 水分结冰时体积膨胀约为1.1倍, 产生的冰胀压力可达 $3\text{ MPa}$ , 高于材料本身的抗拉强度。当温度回升至 $0^{\circ}\text{C}$ 以上, 冰晶融化形成新的孔隙路径, 使更多水分渗入裂隙, 进入下一轮循环。反复的膨胀和融化过程在材料内部积累破坏能量, 导致微观裂缝不断扩展, 孔隙率上升, 结构完整性下降。在每轮循环中, 冻结时冰晶优先生长于孔壁, 诱发内应力集中, 融化后局部空隙形成毛细吸水效应, 使得裂缝区域持续受潮, 从而形成恶性循环。随着冻融次数的增加, 材料弹性模量逐步降低, 微结构骨架损伤加剧, 界面结合能力减弱, 最终引发宏观破坏<sup>[1]</sup>。

### 1.2 屋面结构材料的冻融响应特性

屋面系统由防水层、保温层与找坡层构成, 各层材料对冻融变化的反应具有显著差异。SBS改性沥青具有良好的柔韧性与低温延展性, 其玻璃化转变温度约为 $-20^{\circ}\text{C}$ , 适应大多数低温环境。在30次冻融循环后, 其拉伸强度从

1.5 MPa 下降至 1.1 MPa, 延伸率下降超 20%。保温层常用的挤塑聚苯板为闭孔结构, 初始吸水率较低, 但在反复冻融作用下微孔损伤扩大, 10 次循环后吸水量从  $4 \text{ L/m}^3$  上升至  $10 \text{ L/m}^3$ , 导致保温性能下降。水泥砂浆找坡层在冻融过程中因水化产物结构破坏, 抗压强度由 24 MPa 降至 17 MPa, 孔隙率上升造成强度衰退。不同材料在热胀冷缩过程中形成不均匀变形, 界面产生剪切应力集中, 加速剥离或开裂, 尤其在昼夜温差较大的环境中更为严重, 结构耐久性明显下降。

### 1.3 冻融作用对界面粘结性能的影响

SBS 改性沥青与保温层之间的界面在冻融环境中会受到温度波动与含水率变化的双重作用, 其胶结层在反复的张拉应力与冰胀应力下逐渐疲劳, 形成微裂纹并不断扩展, 最终导致界面剥离破坏。试验模拟典型屋面结构, 将 SBS 沥青热熔铺设于挤塑聚苯板上, 在  $-15^\circ\text{C}$  至  $15^\circ\text{C}$  温差范围内进行多轮冻融循环。结果显示, 随着循环次数的增加, 界面粘结强度呈持续下降趋势, 剥离破坏逐渐从局部微裂纹发展为整体界面失效。界面显微分析表明, 裂纹扩展主要集中于沥青胶结层与保温板表面之间的弱结合区域, 保温层残留沥青显著减少, 说明胶结层附着性能下降明显。上述现象表明, 冻融循环不仅削弱了材料本体的力学性能, 更在界面区域引发应力集中与微观结构退化, 从而加速胶结层失效过程。因此, 冻融环境是界面破坏的关键诱因, 需通过改进界面处理和增强材料适应性来提高屋面系统的耐久性<sup>[2]</sup>。

## 2 材料特性与界面粘结性能分析

### 2.1 SBS 改性沥青的结构特性

SBS 改性沥青是一种以苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物为改性剂的高分子弹性体材料, 通过物理共混或反应改性方式与基质沥青形成两相复合体系。这种结构使其同时具备弹性体与塑性体特征, 在低温条件下表现出良好的柔韧性, 在高温条件下具备较强的形变恢复能力。SBS 分子链中间的丁二烯段赋予材料高弹性, 端部苯乙烯段则提供一定的刚性支撑结构, 整体呈现网状聚集与基质相互交联状态。在常温下, SBS 颗粒均匀分布于沥青基体中, 形成多点支撑的三维骨架结构, 这种结构能够提高材料的抗裂性与延伸性, 并显著改善其应力松弛行为。在老化前, 典型 SBS 改性沥青的拉伸强度可达 1.6 MPa, 延伸率大于 800 mm, 其剪切粘度较普通沥青提高约 1.8 倍。SBS 材料对温度变化较为敏感, 在  $-10^\circ\text{C}$  以下出现黏弹模量上升趋势, 随着温度进一步下降至  $-25^\circ\text{C}$ , 材料由橡胶态转向玻

璃态, 微观结构由柔性链段主导转向刚性分子链主导, 使其低温性能开始下降。当暴露在冻融环境中反复循环时, SBS 结构逐步发生微裂纹、链段断裂以及聚集体分散不均等微观变化, 影响其与其他材料的粘结性能。

### 2.2 保温层常用材料特性分析

屋面系统中保温层材料选择直接关系到热工性能与界面稳定性, 其性能变化对整个粘结系统影响显著。目前工程常用的保温层材料主要包括挤塑聚苯乙烯板、聚氨酯泡沫板和岩棉板等, 其中以挤塑聚苯乙烯板最为常见。挤塑板为连续闭孔结构, 孔隙直径集中在 0.2 mm 至 0.5 mm 之间, 材料密度一般在  $30 \text{ kg/m}^3$  左右, 导热系数维持在  $0.028 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , 抗压强度在标准状态下约为 250 kPa, 其表面光滑, 极性较低, 界面附着力依赖于机械嵌合与界面处理。聚氨酯泡沫板为开放与闭孔混合结构, 密度约为  $40 \text{ kg/m}^3$ , 表面多孔粗糙, 对粘结材料的渗透吸附能力较强。岩棉板则为纤维状材料, 表观密度较大, 导热性能略差, 但具有良好的防火性能。不同材料在冻融循环中表现出差异性响应, 挤塑板在反复冻融后孔隙结构破坏程度较高, 吸水量增长导致尺寸稳定性下降, 进而影响其与防水层的界面粘结效果。聚氨酯泡沫在低温环境中容易发生脆化, 体积变化显著, 界面应力分布不均使得胶结层受到剪切破坏。岩棉材料由于纤维结构中的吸水性强, 在冻结阶段吸附水分易形成冰桥作用, 界面强度下降速度较快。上述材料的热膨胀系数、吸水特性与表面结构决定了其与 SBS 改性沥青的界面结合性能差异, 需要在实际应用中根据气候条件、结构形式与施工工艺综合选用, 并针对性设计界面处理方式以提升界面稳定性<sup>[3]</sup>。

### 2.3 界面粘结力的主要影响因素

SBS 沥青与保温层之间的粘结性能受多种因素影响, 包括材料性能匹配度、界面处理方式、施工温度以及冻融环境等。在材料方面, SBS 改性沥青的软化点、低温柔韧性以及其分子结构稳定性决定了其胶结层的耐久性, 保温材料的表面孔隙结构与特性则影响沥青的润湿和渗透能力。在界面处理方面, 采用火焰加热、界面涂刷或附加无纺布处理可提高界面粗糙度, 增加有效接触面积, 使界面粘结强度显著提高。例如, 在对比未处理与涂刷界面剂的挤塑板试样中, 界面粘结强度由 0.43 MPa 提升至 0.71 MPa, 增长效果明显。在施工温度方面, 热熔施工温度过低会导致沥青黏度过大, 难以均匀铺展并嵌入保温层表面微孔; 施工温度过高则可能引发材料老化或保温层热损伤。在冻融环境中, 循环作用引起的界面应力集中和裂纹积累是粘

性能衰退的核心原因。界面微裂纹常源于界面胶结层不均匀冷缩,冷缩应力可达到 0.4 MPa 至 0.6 MPa 范围,在吸水条件下形成冰胀压应力后,使局部应力峰值突破界面破坏阈值,导致粘结层失效。试验结果表明,在 40 次冻融循环作用后,未做界面处理的 SBS-挤塑板系统粘结强度下降至 0.42 MPa,而经界面涂刷和加热处理的同类系统仍保持在 0.65 MPa,说明界面处理方式在应对冻融破坏中具有关键作用。保温层材料密度与孔隙率变化也会对界面应力分布与吸水能力产生影响,从而间接左右粘结层的劣化速度。界面粘结系统作为多材料耦合区域,在冻融环境下的稳定性需综合考虑物理性能、界面结构与环境适应性,通过工艺优化提升其整体可靠性。

### 3 界面剥离试验与结果分析

#### 3.1 试验设计与样品制备

本试验旨在研究 SBS 改性沥青与保温层之间的界面在冻融环境下的剥离性能变化规律,明确冻融循环对界面粘结强度的衰减趋势,并分析其破坏特征。实验对象选取 SBS 改性沥青卷材与挤塑聚苯乙烯板(XPS)作为组合界面。沥青卷材厚度为 4 mm, XPS 板厚度为 30 mm,样品尺寸为 100 mm × 100 mm。采用热熔方式将 SBS 沥青卷材均匀铺设在保温板表面,热熔温度控制在 180℃至 200℃之间,并施加 10 N/cm<sup>2</sup>的压力保持 10 分钟,以保证良好粘结效果。样品制备完成后,自然养护 24 小时以稳定界面结构。冻融循环试验依据 GB/T 50082 标准进行,设定温度范围为 -15℃至 15℃,一个完整循环为 12 小时,包括冻结阶段 6 小时与融化阶段 6 小时,每组样品设定不同冻融循环次数,分别为 0 次、10 次、20 次、30 次与 40 次。每组配置 3 个平行试样,采用拉剥试验机进行界面剥离强度测试,加载速率为 10 mm/min,记录最大剥离力并换算为剥离强度值,以评估冻融对界面粘结性能的影响<sup>[4]</sup>。

#### 3.2 冻融循环下的剥离试验结果

在冻融循环试验结束后,分别对各组样品进行拉剥试验,测试其界面剥离强度,数据取每组三个样品的平均值。剥离试验结果如下表所示。

表1 不同冻融循环次数下的界面剥离强度结果

| 冻融循环次数 | 剥离强度 (MPa) |
|--------|------------|
| 0      | 0.96       |
| 10     | 0.81       |
| 20     | 0.64       |
| 30     | 0.5        |
| 40     | 0.38       |

从表中数据可以看出,界面剥离强度随着冻融循环次

数的增加呈现持续下降趋势。初始状态下界面剥离强度为 0.96 MPa,经过 10 次冻融循环后下降至 0.81 MPa,下降幅度为 0.15 MPa。继续至 20 次循环时,剥离强度降至 0.64 MPa,总体降低 0.32 MPa。第 30 次与第 40 次后,剥离强度分别为 0.50 MPa 与 0.38 MPa,整体粘结性能衰退明显。剥离面观察显示,剥离路径逐渐从混合破坏向粘结破坏转变,说明冻融循环导致界面胶结层微结构退化,界面破坏逐步集中于粘结界面而非材料本体。试样在第 10 次循环后,剥离力下降的速率明显加大,但在第 30 次和第 40 次循环中,下降幅度继续保持稳定,表明界面粘结力的劣化过程存在阶段性特征。

#### 3.3 剥离机理及破坏模式分析

剥离机理分析从界面结构变化与微观破坏过程两方面展开。SBS 改性沥青在加热状态下与 XPS 保温板形成物理粘附与机械嵌合双重作用的界面结构,正常状态下界面具备一定延展性与微量应力缓冲能力。冻融循环作用导致沥青层热应力变化频繁,胶结层内部形成应力集中区,当冰胀力与冷缩应力共同作用时,界面出现微裂纹。随着循环次数增加,裂纹逐步扩展,造成界面局部失稳。当水分渗入界面后在低温条件下冻结,冰晶形成产生向外的膨胀力,使界面层产生剥离驱动力,加速弱结合区破坏。在材料层面,XPS 板因低极性与致密表面结构限制了胶结层渗透深度,粘结力主要依赖界面张力与熔合面粗糙度。剥离试验中破坏模式以胶结层分离为主,在部分试样中观察到 XPS 表面残留部分沥青,说明在初期粘结较好区域仍存在一定抗剪强度。试样剥离形貌分析发现第 10 次循环前的破坏面形貌较为平整,说明剥离路径分布均匀,胶结层尚处于稳定状态。20 次后局部破坏面出现撕裂纹迹与不规则断裂区域,说明微裂纹已贯通界面层结构。至 40 次循环后,大部分试样表现为界面层整体剥离,接触面积残留极少,界面完全失效。破坏模式的演变说明粘结层在冻融环境下由塑性阶段逐步转向脆性阶段,材料黏结性能与界面适应能力显著降低,验证了冻融循环是引发剥离破坏的关键环境因素<sup>[5]</sup>。

### 4 结语

在多轮冻融循环作用下,屋面系统中 SBS 改性沥青与保温层的界面粘结性能发生明显退化,界面逐步失去有效粘结力,剥离现象日益显著。研究围绕冻融过程中的物理机制、材料响应行为与界面破坏路径,构建了系统的试验方法,获得了不同循环阶段下界面强度变化的关键数据。从剥离强度衰减趋势与破坏形貌的演变中可以看出,温度

波动和水分迁移是导致粘结层结构劣化的主要因素。通过界面处理工艺与材料适配性分析,为寒冷地区屋面构造的稳定性和耐久性提供了实验依据与理论支持。研究成果对建筑围护系统设计、材料选型及施工质量控制具有重要指导意义,具有较高的实际应用价值和研究推广空间。

#### 参考文献:

[1] 夏洋洋,李鹏宇,申晨明等.碳纤维对 SBS 改性沥青材料低温抗裂性能的影响[J].山西建筑,2025,51(21):121-128.

[2] 汪林,贾保正.废塑料/温拌 SBS 干法改性沥青混合料性能研究[J].建材世界,2025,46(05):25-30.

[3] 崔永昌,赵云辰,李昶等.寒区沥青稳定碎石冻融损伤力学性能及损伤模型研究[J/OL].冰川冻土,1-10[2025-11-06].

[4] 欧阳勇.盐冻循环侵蚀作用对沥青混合料宏观细观结构性能的影响[J/OL].路基工程,1-7[2025-11-06].

[5] 李虹熹.钢桥面高韧密水型沥青混凝土铺装层研究[D].重庆交通大学,2025.