寒冷地区沥青心墙坝抗冻保温配套设计技术

王中平

塔城水利设计研究院有限公司，中国 ·新疆 塔城 834700

摘要：在我国西部高寒及东北严寒地区，沥青混凝土心墙坝因其优异的防渗性能与变形适应能力，已成为高坝建设的重要选型。然而，极端低温、剧烈温差及季节性冻融循环对沥青材料的流变特性、界面粘结性及结构整体性构成了严峻挑战，传统温带地区的设计经验难以直接移植。本文系统综述了寒冷地区沥青心墙坝抗冻保温配套设计技术的理论进展、工程实践与优化路径。

关键词：寒冷地区；沥青心墙坝；抗冻保温；配套设计；温度应力；过渡料；全寿命周期

Cold-Region Asphalt Core Dam Design Technology for Freeze Resistance and Thermal Insulation

Wang Zhongping

Tacheng Water Conservancy Design and Research Institute Co., Ltd., China Xinjiang Tacheng 834700

Abstract: In China's western cold regions and northeastern severely cold areas, asphalt concrete core dams have become a preferred option for high dam construction due to their excellent impermeability and deformation adaptability. However, extreme low temperatures, large temperature fluctuations, and seasonal freeze-thaw cycles pose serious challenges to the rheological properties, interface bonding, and structural integrity of asphalt materials, making it difficult to directly apply design experience from temperate regions. This paper systematically reviews the theoretical advances, engineering practices, and optimization approaches in the integrated design technology for freeze resistance and thermal insulation of asphalt core dams in cold regions.

Keywords: Cold region; Asphalt core dam; Freeze resistance and thermal insulation; Integrated design; Temperature stress; Transition material; Life cycle

0 引言

沥青混凝土心墙坝以其良好的柔性、自愈性及抗震性能，在全球范围内得到广泛应用。在我国，随着西部大开发战略的深入推进与清洁能源基地的建设需求，一批 200 米级乃至 300 米级的高沥青心墙坝正规划或建于青藏高原、天山山脉及东北高纬度地区。这些区域年均气温低、冬季漫长、昼夜温差大、冻融循环频繁，部分坝址极端最低气温可达零下四十摄氏度以下。在此类严酷环境中，沥青混凝土的物理力学行为发生显著异化：低温脆性增加导致开裂风险剧增；反复冻融削弱骨料 – 沥青界面粘结，诱发内部微裂纹扩展；坝体内外巨大温差产生非均匀收缩，引发结构性温度应力；库水位变动区的心墙表面更易遭受冰推力与冻胀力的直接破坏。历史上，国内外曾有多座寒区沥青坝因抗冻设计不足而出现心墙裂缝、渗漏甚至局部失稳的案例，造成了巨大的经济损失与安全隐忧。尽管现行《水工沥青混凝土施工规范》及部分行业标准对低温施工提出了基本要求，但针对“抗冻保温配套设计”的系统性技术指导仍显薄弱。

1 寒冷环境下沥青心墙损伤机理与保温设计理论基础

准确认知低温与冻融对沥青心墙的致损机制，是开展有效保温设计的科学前提。这一过程涉及材料微观结构演变、宏观力学响应及多场耦合效应的复杂交互。

1.1 低温脆化与温度应力累积的耦合失效机制

沥青是一种典型的粘弹性材料，其力学性能高度依赖温度。当环境温度低于沥青的玻璃化转变温度或脆点时，分子链运动受阻，材料由粘弹态向玻璃态转变，延展性急剧下降，断裂能显著降低。在坝体自重、水压力及约束条件下，这种脆化状态使心墙难以通过蠕变松弛释放温度应变，导致拉应力快速累积。尤其在水库蓄水初期或水位骤降时，心墙迎水面温度骤变，而背水面仍处于相对稳定状态，形成巨大的横向温度梯度。若保温措施不足，该梯度可诱发超过材料抗拉强度的环向或竖向裂缝。更严重的是，裂缝一旦形成，不仅破坏防渗完整性，还会成为冷空气与水分的侵入通道，加速内部冻融损伤，形成“开裂 – 渗水 – 冻胀 – 再开裂”的恶性循环。因此，保温设计的首要

目标是控制心墙内部温度场分布，使其始终处于沥青的安全工作温区内，并将温度梯度限制在允许范围内。这要求设计者超越静态热传导计算，引入考虑施工期水化热、运行期库水温变化及气象边界条件的瞬态热 – 力耦合分析。

1.2 冻融循环作用下界面劣化与渗透性演化规律

寒冷地区年冻融循环次数可达数十至上百次，对沥青混凝土的耐久性构成持续考验。水分通过孔隙或微裂缝渗入心墙内部，在冻结时体积膨胀约百分之九，产生巨大的内应力；融化时又因毛细作用重新分布，反复挤压骨料 – 沥青界面。长期作用下，界面粘结逐渐退化，孔隙率增大，渗透系数呈指数级上升。研究表明，经历五十次冻融后，未采取防护措施的沥青混凝土渗透系数可增加一至两个数量级，远超设计允许值。值得注意的是，这种劣化具有明显的阈值效应：当初始孔隙率低于某一临界值（通常为百分之三至四），且沥青膜厚度足够时，材料表现出较强的抗冻性；反之则迅速失效。此外，库水位变动区的心墙表面还承受冰盖推拉与冻胀上拔力，易造成表层剥落与接缝张开。因此，抗冻保温设计必须兼顾“防”与“耐”：一方面通过保温层减少冻融深度与频次；另一方面通过优化配合比提高材料自身的抗冻储备。二者缺一不可，且需在设计与材料选型阶段同步考量。

1.3 保温系统与坝体结构的协同工作机理

保温层并非孤立存在的热障，而是与心墙、过渡料、坝壳共同工作的复合结构体系。其功能不仅在于隔热，还在于调节应力传递、协调变形及保护接缝。若保温材料与相邻介质刚度差异过大，可能在界面处产生应力集中或脱空；若保温层过厚，虽降低了温度波动，却可能阻碍心墙正常散热，导致夏季内部积热软化；若过渡料级配不当，细颗粒易侵入保温层孔隙，降低其隔热效能并堵塞排水通道。因此，配套设计必须建立“系统思维”，将保温层视为坝体结构的功能延伸。例如，在心墙两侧设置级配优化的过渡料，既可防止粗骨料刺破保温板，又能提供均匀的支撑反力，避免局部压碎；在坝顶与岸坡连接处采用柔性保温材料与特殊止水构造，以适应不均匀沉降与温度变形。这种协同设计理念要求打破专业壁垒，实现岩土、材料、结构与热力学的交叉融合，确保保温系统在复杂荷载与环境作用下长期稳定有效。

2 抗冻保温配套设计关键技术与方法创新

基于上述机理认知，近年来在材料适配、结构优化与设计方法等方面取得了一系列技术创新，推动了寒区沥青心墙坝设计水平的提升。

2.1 寒区专用沥青胶浆与混合料配合比优化技术

通用道路沥青或温带水工沥青难以满足极寒要求。针对寒区特点，研发了高针入度、低蜡含量、富含芳香分的基质沥青，并掺加 sbs、sbr 等聚合物改性剂及抗剥落剂，显著提升低温延度与粘附性。同时，优化矿料级配，采用间断级配或富油设计，增加沥青膜厚度至十微米以上，以缓冲冻胀应力；严格控制填料用量与亲水性，减少自由水滞留空间。室内冻融劈裂试验、低温弯曲梁流变试验及四点弯曲疲劳试验成为必检项目，确保混合料在设计最低温度下仍具备足够的断裂韧性与自愈能力。更重要的是，建立了“气候分区 – 材料性能 – 结构响应”联动设计方法：根据坝址气象数据划分寒区等级，对应不同性能指标的沥青胶浆配方；结合坝高与运行条件，动态调整油石比与空隙率目标值。这种定制化设计避免了“一刀切”带来的过保守或欠安全，实现了材料性能与工程需求的精准匹配。

2.2 过渡料级配与保温层厚度的动态协同设计

过渡料是连接心墙与保温层的关键纽带，其级配直接影响保温效果与结构稳定性。传统设计多沿用砂砾料经验级配，未考虑保温材料的特殊性。新近研究提出“功能导向级配”理念：靠近心墙侧采用细粒含量较高的级配，确保压实度高、渗透性低，起到辅助防渗与平整基面作用；靠近保温层侧采用开级配或单粒径碎石，形成稳定骨架，防止细料迁移堵塞保温板孔隙，同时提供良好排水通道。保温层厚度不再依赖固定经验值，而是通过三维瞬态热传导模拟，结合当地气温、风速、日照、库水温及坝体材料热参数，计算不同厚度下心墙全年温度场分布，以满足“最低温度高于脆点、最大温差小于允许值、冻融循环次数低于耐久阈值”为约束条件，反推最优厚度。对于向阳面与背阴面、坝顶与坝基等不同部位，实行差异化厚度设计，避免过度保温造成的资源浪费。这种动态协同设计显著提升了系统的经济性与可靠性。

2.3 接缝止水与细部构造的耐寒适应性设计

接缝是寒区沥青心墙最薄弱的环节。传统铜片或橡胶止水在极低温下易硬化、脆裂或与沥青脱粘。新型耐寒止水系统采用三元乙丙橡胶（epdm）或硅橡胶等低温弹性体，配合热熔型改性沥青止水胶，确保在零下四十摄氏度下仍保持柔性与粘结力。在岸坡、坝基及廊道连接处，设计可压缩泡沫板与滑动支座，吸收不均匀变形，避免刚性约束导致的撕裂。坝顶防浪墙与心墙顶部衔接处，增设柔性保温盖板与排水槽，防止积雪融水倒灌与冰楔作用。库水位变动区心墙表面，采用加厚保温层与抗冲磨护面相结

合，抵御冰凌撞击与冻胀剥离。所有细部构造均经过低温环境舱模拟验证，确保其在设计寿命内功能完好。这种“细节决定成败”的设计理念，弥补了整体保温的盲区，大幅提升了系统的鲁棒性。

3 设计验证、施工保障与未来发展方向

设计的有效性最终需通过施工实现并经长期运行检验。当前，在验证手段、施工协同及前瞻性研究方面仍有待深化。

3.1 多尺度试验验证与长期性能预测模型的构建

室内小试件试验难以真实反映坝体尺度的温度场与应力场分布。亟需建立“室内单元试验 – 中型模型试验 – 现场原型监测”三级验证体系。中型模型试验可在可控环境下模拟冻融循环与温度梯度，验证保温系统整体效能；现场埋设分布式光纤测温、应变计及渗压计，获取真实服役数据。基于多源监测数据，结合机器学习算法，构建考虑材料老化、界面退化及气候变迁的长期性能预测模型，实现从“事后评估”到“事前预警”的转变。目前，此类模型尚处于探索阶段，参数标定与不确定性量化是主要瓶颈。未来应加强跨项目数据共享与标准化数据库建设，为模型训练提供高质量样本。

3.2 低温施工工艺与质量控制的配套保障技术

再好的设计也需精准施工来实现。寒区沥青心墙施工窗口期短，温度控制极为关键。开发了拌和楼骨料加热、运输罐车保温、摊铺机预热及碾压后即时覆盖等全流程温控工艺，确保混合料出机、摊铺及终压温度始终高于规范要求。采用红外热成像仪实时监测铺面温度场，及时发现冷缝与离析区域。保温板安装采用机械固定与粘结复合工艺，确保贴合紧密、无空鼓；接缝处采用热风焊接或专用胶带密封，杜绝冷桥。建立施工质量数字档案，将每仓浇筑温度、压实度、保温层铺设质量等信息与 bim 模型关联，实现全过程可追溯。这种“设计 – 施工”一体化管控，是保障抗冻保温系统落地生效的关键环节。

3.3 面向气候变化的韧性设计与生态兼容性提升

全球变暖背景下，寒区气温波动加剧，极端暖冬与寒潮交替出现，对保温设计的适应性提出新要求。未来设计应引入气候情景分析，评估不同升温路径下保温系统的冗余度与失效风险，预留可升级接口（如可更换保温层、可注入防冻液通道）。同时，强化生态兼容性：选用无毒、可回收的保温材料；避免使用含氟发泡剂；在坝坡植被恢复中考虑保温层对土壤温度的影响，选择耐寒适生植物。推动抗冻保温设计与生态修复、景观营造的深度融合，使大坝不仅是安全屏障，更是寒区生态系统的有机组成部分。这种前瞻性与包容性，是新时代水利工程高质量发展的必然要求。

4 结语

寒冷地区沥青心墙坝的抗冻保温配套设计，是一项融材料科学、热力学、结构工程与生态学于一体的复杂系统工程。它超越了单纯的技术叠加，体现了人类在极端环境中与自然共处的智慧与谦卑。当我们不再将严寒视为必须对抗的敌人，而是理解其节律并与之共舞；当保温不再是事后的补救，而是与坝体共生共长的生命肌理；当每一寸沥青、每一块保温板都承载着对安全的敬畏、对资源的珍惜与对未来的责任，大坝便不再是冰冷的构筑物，而成为寒区大地上一道温暖而坚韧的守护线。前路依然充满挑战，新材料的长期验证、多场耦合模型的精度提升、气候变化下的适应性调整，都需要我们以严谨之志持续深耕。但只要我们坚持系统思维、尊重自然规律、拥抱技术创新，就一定能在冰封雪裹之地筑起既安全可靠又生生不息的水利丰碑。这不仅是对工程技艺的锤炼，更是对文明韧性的锻造——让每一座寒区大坝都成为人与自然和谐共生的见证，让每一次寒冬考验都化作对智慧与良知的礼赞。在守护江河安澜的道路上，我们终将明白：真正的坚固，源于对寒冷的深刻理解与温柔相待；真正的温暖，来自对生命的无限珍视与不懈守护。

参考文献：

[1] 杨白军. 高寒冷地区碾压式沥青心墙坝冬季施工关键技术浅析[J]. 陕西水利，2016(1): 82-83. DOI:10.16747/j.cnki.cn61-1109/tv.2016.01.037.

[2] 杨白军. 高寒冷地区碾压式沥青心墙坝冬季施工关键技术研究[J]. 吉林水利，2015(7): 27-29. DOI:10.15920/j.cnki.22-1179/tv.2015.07.007.

[3] 王为标，Kaare Heg. 沥青混凝土心墙土石坝：一种非常有竞争力的坝型[C]// 中国长江三峡集团公司 (China Three Gorges Corporation)，中国水电工程顾问集团公司，中国水利水电建设集团公司，中国葛洲坝集团公司，中国大坝协会.现代堆石坝技术进展：2009——第一届堆石坝国际研讨会论文集. 中国水利水电出版社，2009: 79-84.

[4] 廖腾耀，吴俊杰. 新疆严寒地区某水电站浇筑式沥青混凝土心墙坝的设计[J]. 水利科技与经济，2020, 26(6): 63-67.

[5] 刘典忠. 高海拔寒冷地区沥青混凝土心墙坝施工关键技术. 天津市，中国水电基础局有限公司，2020-08-20.