

室内滑雪场冷库墙板保温材料综合对比研究

尚赛赛

上海宝冶集团有限公司安装工程公司, 上海 201999

DOI:10.61369/UAID.2026010028

摘 要 : 从室内滑雪场冷库特殊的环境要求出发, 在导热系数、吸水率、防潮性能、防火等级和尺寸稳定性等五个主要指标上对聚异氰脲酸酯 (PIR)、挤塑聚苯乙烯 (XPS)、气凝胶、真空绝热板 (VIP)、酚醛泡沫、岩棉、发泡玻璃等 7 种保温材料进行了试验检测和对比分析, 并通过数据分析和工程实例验证, 发现 PIR 材料具有 0.019–0.023W/(m · K) 的导热系数、≤ 1% 的吸水率、B1 级阻燃性能以及 –30℃ <1% 的线性收缩率, 综合性能最为突出。对于室内滑雪场的低温高湿 (温度 –3 ~ –5℃、湿度 75%)、防火要求高、运行年限长等因素组成的不利条件, 只有 PIR 材料是最佳的选择, 选用 150mm 厚的 PIR 板作为室内滑雪场冷库墙板保温材料相比其他传统保温材料可节能 35% 以上, 并且全寿命周期成本最低。

关 键 词 : 室内滑雪场; 冷库保温; PIR; 材料对比; 导热系数; 防火性能

Comprehensive Comparative Study on Insulation Materials of Cold Storage Wall Panel in Indoor Ski Resort

Shang Saisai

Installation Engineering Company Of Shanghai Baoye Group Corp.,Ltd. Shanghai 201999

Abstract : Based on the specific environmental requirements of indoor ski resort cold storage, this study conducted experimental testing and comparative analysis of seven insulation materials—polyisocyanurate (PIR), extruded polystyrene (XPS), aerogel, vacuum insulation panels (VIP), phenolic foam, rock wool, and foamed glass—across five key performance indicators: thermal conductivity, water absorption rate, moisture resistance, fire resistance rating, and dimensional stability. Through data analysis and engineering validation, PIR material was identified as the most outstanding option, demonstrating a thermal conductivity of 0.019–0.023 W/(m · K), water absorption rate ≤ 1%, B1–grade flame retardancy, and linear shrinkage rate <1% at –30 ° C. Under the adverse conditions of indoor ski resort cold storage—characterized by low–temperature high–humidity environments (–3 to –5 ° C, 75% humidity), stringent fire safety requirements, and extended operational lifespan—PIR material emerged as the optimal choice. The use of 150mm–thick PIR panels as wall insulation material for indoor ski resort cold storage achieved over 35% energy savings compared to conventional insulation materials, while also offering the lowest lifecycle cost.

Keywords : indoor ski resort; cold storage insulation; PIR; material comparison; thermal conductivity; fire resistance

引言

本文选取七类代表性的保温材料进行比较, 根据导热系数、吸水率、防潮性、防火等级以及尺寸稳定性五项指标来做出判断。选用的依据是: 保温材料的基础保温效能由导热系数决定; 吸水率和防潮性是影响材料的正常使用期限的保障; 防火等级是关系到人员密集场所的基本安全要求; 保温材料尺寸稳定性良好可以保证使用过程中的密闭性能。利用上述标准对保温材料进行系统性的对比分析, 并在以往工程应用中验证了 PIR 在滑雪场冷库中的综合优势, 为其设计施工提供理论参考。

一、保温材料核心参数对比研究

（一）导热系数与保温效能

评价保温材料节能性的核心指标是导热系数。在滑雪场的低温环境下，较低的导热系数能有效减少冷量损失，从而减轻制冷系统的负荷。以下是七类保温材料的导热特性，具体数据请见表1。

表1：保温材料导热系数对比表

材料类型	常温导热系数 (W/(m·K))	-30℃下变 化率	温度稳定性
PIR	0.019 - 0.022	-6.2%	-200~+110℃稳定
XPS	0.030 - 0.035	-4.1%	>-10℃易脆裂
气凝胶毡	0.014 - 0.016	-2.8%	-200~+1400℃优异
VIP	0.004 - 0.008	+15%	破损后急剧上升，在低温环境中边缝漏气风险导致实际导热系数上升 ^[9]
酚醛泡沫	0.025 - 0.035	+8.5%	-196~+150℃良好
岩棉	0.040 - 0.057	+9.6%	低温吸湿后升高
发泡玻璃	0.040 - 0.055	+5.0%	-268~+430℃优异

保温效能分析：

（1）气凝胶与VIP的导热系数在理论上是最佳值，但是气凝胶相对于PIR的单位面积价格高5~8倍（每平米¥300~500），经济性欠佳；而VIP的玻纤芯材、阻隔膜材料，在滑冰馆等有振动能的滑雪场应用过程中容易破碎失效，且年平均性能衰减值大于5%，需要定期更换，维护费用较高。

（2）PIR的导热系数为（0.019 - 0.022 W/(m·K)），仅次于气凝胶和与VIP，但是PIR的成本仅为气凝胶的1/5~1/8。在哈尔滨的融创雪世界项目中，其中滑雪场的施工，采用了150mm厚PIR板替代原XPS板的施工方案，使滑雪场冷库每年节约电量约为35%^[1]。

（3）XPS与酚醛泡沫的导热系数排列居中为（0.030 - 0.035 W/(m·K)），需要增加约50%的厚度才能达到与PIR同等的保温效果，而且增加厚度会占用了雪道更多空间，从而减少了雪道的有效宽度。

（4）岩棉和发泡玻璃由于其纤维或多孔结构，不可避免地存在热桥效应，导致其导热系数超过0.040 W/(m·K)。，在滑雪场低温环境下，保温效果达不到要求^{[3][8]}。

（二）吸水率与防潮性能

由于滑雪场高湿环境的要求，材料需要具有抗水汽渗透的能力，吸水率会直接影响到材料的保温效果，过高会造成材料变质甚至导致结块。测试标准：GB/T8810-2005硬质泡沫塑料吸水率测定法（浸水96h）^[10]，各材料闭孔结构与吸水率对比如下表2所示：

表2：吸水率与防潮性能对比表

材料类型	吸水率 (%)	闭孔率 / 结构	防潮缺陷
PIR	≤1.0	97%闭孔	接缝需密封处
XPS	<2.0	90%闭孔	板边缘易渗水
气凝胶毡	<3.0	多孔纳米结构	需覆铝箔隔汽层
VIP	近乎0	真空密闭	破损后吸湿失
酚醛泡沫	≤7.0	半开孔	吸湿后导热系数上升30%
岩棉	<3.0	纤维交织	憎水处理失效后易蓄水
发泡玻璃	近乎0	玻璃密封微孔	优异，但接缝需处理

防潮关键发现：

（1）PIR的高闭孔率(97%)及疏水泡孔壁(接触角>90°)能有效防止水汽透过^[1]，PIR使用3年后导热系数仅升高4%，但相同时期的酚醛泡沫因吸水性能下降达32%。

（2）XPS尽管为闭孔结构，但如果板材切割边处在施工过程中处理不好会有渗水通道，过去曾发生过冷量损失增大到40%的情况（内蒙古某项目）。

（3）酚醛泡沫的高吸水性（7%）极易在大于80%的湿度环境储水，引起结露膨胀，从而失去保温功能，需要另行加设隔汽层^[2]。

（4）尽管岩棉经过憎水处理（憎水率≥98%）^[3]，但在长时间高湿环境下仍会发生因纤维间蓄水而使导热系数升高的现象，沈阳某一冷库曾发生过板内结露的情况。

（5）发泡玻璃和VIP本体具有良好的抗水性，但发泡玻璃的刚性结构容易产生温度应力导致接缝开裂，VIP一旦破损就会失去防潮效果^{[4][8]}。

（三）防火安全性能

防火性能对于人员密集的滑雪场来说是至关重要，必须符合不低于B1级的国家标准（GB 8624-2012）。七类材料的防火等级与燃烧特性如下表3所示：

表3：防火安全性能对比表

材料类型	防火等级	燃烧特性	烟气毒性
PIR	B1	自熄，炭化无滴落	s1级（低烟）
XPS	B2	熔融滴落，引燃风险高	s3级（高烟）
气凝胶毡	A	不燃，无机材质	s1级
VIP	B1/B2	取决于包覆材料	膜材燃烧产烟
酚醛泡沫	A	难燃，炭化层阻燃	s1级
岩棉	A	不燃，纤维无火焰扩散	s1级
发泡玻璃	A	完全不燃	无烟气

防火性能分析：

（1）能达到A级不燃的有岩棉、酚醛、气凝胶、发泡玻璃，其中要求岩棉有机物含量≤5%，玄武岩纤维含量≥98%^[7]；酚醛泡沫虽然为难燃材料，但是有一定的高温分解挥发性^[2]。

（2）PIR通过B1级认证，其氧指数≥28%，燃烧时表面快速炭化形成焦化层，阻断氧气与火焰蔓延^[1]。上海某冷库火灾中，PIR墙板成功延缓火势蔓延，为人员疏散争取关键时间。

（3）XPS的防火性能缺陷比较突出，其易燃（B2级）且熔融滴落物特性，会引燃其他物品，不符合GB50072《冷库设计规范》中关于围护材料需达到B1级及以上的要求^[3]。

（4）VIP的防火性能取决于金属箔与阻隔膜材料，如今市场上大部分产品的防护等级仅能达到B2级别，存在很大安全隐患。

（四）尺寸稳定性

滑雪场冷库温度变化大（-30~+10℃），要求材料具有低热膨胀系数和抗冷缩变形的能力。以下是不同材料在低温状态下的尺寸变化：

（1）PIR：线性收缩率<1%（-30℃），采用高压发泡技术，泡孔密度达到20万/cm³的结构，能在-200~+110℃范围内保持良好的稳定性^[1]。

(2) XPS: 在-20℃以下会变脆, 线性收缩率为1.5%~2%, 故内蒙古一滑雪场XPS板缝处发生开裂形成冷桥^[6]。

(3) 气凝胶毡: 柔性基体使其在-200℃下具有良好的抗裂性能, 形变率≤0.5%^[9]。

(4) VIP: 芯材收缩易致阻隔膜褶皱破损, 漏气后保温性能急剧下降。

(6) 酚醛泡沫: 压缩强度仅0.12MPa, 长期荷载下变形风险高, GB/T 8811测试显示-30℃收缩率达1.8%^[2]。

(7) 岩棉: 纤维结构无收缩, 但垂直板面方向受压后易出现不可逆变形(厚减率>10%)^[3]。

(8) 发泡玻璃: 热膨胀系数低($9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), 但脆性大, -50℃冲击韧性下降, 接缝处易碎裂^[4]。

二、综合讨论与工程适配性分析

(一) 基于室内滑雪场需求的性能评分

针对室内滑雪场冷库墙板保温材料的五个关键性能指标(导热系数、吸水率、防潮性能、防火等级、尺寸稳定性)制定了一个评分标准, 每个指标一分, 采用阶梯式评分法, 根据评分标准建立七种材料的量化评分表(满分25分)。

(二) 各材料在滑雪场应用的适配性

1. PIR的综合优势:

(1) 节能性: 超低导热系数(0.019~0.022 W/(m·K))减少冷库能耗20%以上(较XPS基准)。

(2) 安全性: B1级防火通过消防验收, 炭化自熄特性满足人员密集场所规范

(3) 耐久性: 在-30℃时, PIR的收缩率小于1%, 通过运用C型板气密技术(如晟乾钢品案例), 可以实现15年免维护。

(4) 经济性: PIR的单价是150~220元/立方米, 要比气凝胶便宜(300~500元/平方米), 比VIP便宜(200~400元/平方米), 八年可以回收增量成本。

2. 其他材料的局限性:

(1) 气凝胶与VIP: 气凝胶的价格相对于其他保温材料是比較高的(气凝胶单位面积成本是PIR的5~8倍)^[9], 而且气凝胶的

施工复杂性, 也极大的限制了其无法大规模应用于工程上, VIP的年均性能衰减大于5%, 会导致滑雪场后期维护增加很多的成本。

(2) XPS: 其材料的防火等级未能达到国家标准B1级的要求, 而且在-20℃以下会出现脆裂问题, 并且导致接缝失效的情况。

(3) 酚醛泡沫: 吸水率高达7%, 潮湿情况下产品寿命为5~8年; 需要经常更换。

(4) 岩棉: 岩棉的导热系数过高(0.040~0.057 W/(m·K)), 增加50%的材料厚度才能达到同等保温效果, 但是增加岩棉厚度会对雪道的有效宽度造成一定影响。

(5) 发泡玻璃: 切削损耗率达15%, 高导热系数(0.045至0.055 W/(m·K)), 且具有极高的脆性, 因此防潮性会得不到保障, 也增加了使用成本^[4]。

三、结论

本文系统地对比分析了七类保温材料的特性, 并得出了以下结论:

1. PIR总性能远优于各类材料。其导热系数(0.019~0.022 W/(m·K))几乎等同于气凝胶、VIP, 并且只有其他材料的1/5~1/8; 吸水率≤1%优于酚醛泡沫(7%)、岩棉(3%); B1级防火达到规范要求; -30℃收缩率<1%, 长期保持密封。

2. 气凝胶或VIP虽有很好的保温性能, 但因气凝胶单位成本约是PIR的5~8倍, VIP在强振动环境下会加速出现泄露, 年衰减率>5%, 无法满足滑雪场经济及维护方便的要求。

3. XPS、酚醛和岩棉这三种保温材料的短板明显。XPS防火为B2级防火要求不达标、低温脆裂; 酚醛泡沫为吸水率高的材料易老化; 岩棉导热系数高, 浪费了雪道的有效面积。

4. 在工程上验证了建设室内滑雪场冷库保温墙板采用PIR方案的优势, 采用150mm厚PIR板、密度为 $42 \pm 2 \text{ kg/m}^3$ 断桥+气密, 可使得室内滑雪场冷库能源损耗节省约35%, 增量成本回收期<8年^[1]。

综上所述, PIR是当下最适合建设室内滑雪场冷库墙板的保温材料, 以后还可以继续开发耐火性提高到A2级的纳米复合PIR和再生聚酯基PIR等材料, 进一步推动滑雪场建设的低碳化与安全性。

参考文献

- [1] 陈讲运. 闭孔塑料保温泡沫的热参数和应用研究[J]. 清洁能源, 2024: JBUTK2LK0552T0EK.
- [2] 酚醛泡沫板检测标准体系[Z]. 检测技术网, 2025.
- [3] A级复合憎水岩棉板技术参数[Z]. 建材网, 2020.
- [4] FOAMGLAS®泡沫玻璃技术手册[Z]. 慧讯网, 2023.
- [5] 杜柯等. 气凝胶蜂窝板保温材料性能研究[J]. 新型建筑材料, 2019(6).
- [6] 硬质泡沫塑料吸水率测试标准 GB/T 8810-2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [7] A级防火岩棉应用规范[S]. 建筑防火标准汇编, 2025.
- [8] FOAMGLAS®产品特性说明[Z]. 畅言网, 2015.
- [9] 气凝胶绝热毡与传统材料性能对比[Z]. 好期刊, 2019.
- [10] 健明迪检测. 硬质泡沫塑料吸水率试验方法[Z]. 2024.