

高寒地区机电安装工程的材料选择与施工适应性研究

陈文博

天津市晟泰建筑工程有限公司 天津 300270

摘要: 国家西部大开发等战略推进,使大量基建和能源项目在高寒地区(年均温低于0℃,最冷月平均气温低于-10℃,有持续或季节性冻土)落地。机电安装工程是项目核心,其质量影响工程运行效能与安全寿命。但高寒地区极端低温、剧烈温差等严酷环境,对传统机电材料和常规施工工艺挑战严峻。本文系统探讨高寒地区机电安装工程材料选择原则与策略,分析施工适应性技术措施。先剖析高寒环境对金属、非金属及电气材料的影响机理,再针对管道等关键系统提出选型方案,最后从施工组织等多方面阐述提升施工适应性的对策。研究可为高寒地区相关工程设计、施工与运维提供理论依据和实践指导,保障重大工程安全稳定运行。

关键词: 高寒地区; 机电安装; 材料选择; 低温脆性; 施工适应性; 冻融循环

引言

高寒地区地理气候独特,是国家战略资源储备地、生态屏障,也是工程建设难点,青藏高原等多地属典型高寒地带。这里冬季漫长严寒,极端低温超-50℃,昼夜及季节温差大,有永久或季节性冻土,空气稀薄干燥、紫外线强。机电安装工程涵盖多专业,在此面临巨大考验。传统机电材料和施工方法在常温下表现良好,高寒下却性能劣化,如普通碳钢低温脆断、塑料管道冷缩开裂、电缆绝缘层硬化龟裂、常规焊接接头低温生裂纹。这些问题若未妥善解决,会埋下安全隐患,造成经济损失与人员伤亡。所以科学选材、制定适配施工工艺是关键。但目前相关规范标准多为原则性规定,工程实践也常因经验或成本采用不当方案。

1 高寒环境对机电材料性能的影响机理

1.1 对金属材料的影响

低温脆性是金属材料在高寒地区面临的首要威胁。随着温度降低,金属内部原子间的结合力增强,位错运动受阻,材料由韧性状态向脆性状态转变。这种转变发生的温度称为韧脆转变温度(DBTT)。当工作温度低于DBTT时,材料在受到冲击载荷或存在微小缺陷时,极易发生无预警的脆性断裂。普通Q235B碳素结构钢的DBTT约为-20℃,在东北漠河(冬季最低温-52.3℃)或青藏高原腹地显然无法满足安全要求。此外,热应力问题也不容忽视。高寒地区昼夜温差常超过30℃,甚至达到50℃以上。金属材料在反复的热胀冷缩过程中,会在约束部位(如固定支架、法兰连接处)产生巨大的交变应力,长期作用下可能导致疲劳开裂,进而影响整个系统的结构完整性与密封性能。

1.2 对非金属材料的影响

非金属材料,特别是聚合物(塑料、橡胶),对低温极为敏感。玻璃化转变是其核心问题。当温度降至玻璃化转变温度(T_g)以下时,高分子链段运动被冻结,材料从柔软、有弹性的高弹态转变为硬而脆的玻璃态。例如,常用的PVC-U(硬聚氯乙烯)管材T_g约为80℃,但在0℃以下其冲击强度已大幅下降,极易在搬运或水锤压力下破裂。同样,EPDM(三元乙丙橡胶)密封圈在-40℃以下会失去弹性,导致密封失效^[1]。冻融循环对于含有水分的非金属材料(如某些保温材料、混凝土基座)尤为致命。水在结冰时体积膨胀约9%,在材料内部孔隙中产生巨大的膨胀压力。反复的冻融作用会使材料内部结构疏松、剥落,最终丧失功能,这在保温层吸湿后尤为明显,不仅降低保温效果,还可能引发腐蚀等问题。

1.3 对电气材料的影响

电气系统的可靠运行是高寒工程的生命线。低温环境下,电缆绝缘与护套材料(如PVC、XLPE)会硬化、收缩,不仅机械性能下降,还可能在弯曲处产生微裂纹,破坏绝缘完整性。同时,低温会增加导体的电阻率,影响输电效率。电子元器件的性能也会随温度变化。电解电容器的容量会减小,半导体器件的开关特性会发生漂移,液晶显示屏可能无法正常工作。更为严重的是,设备外壳与内部元件因材质不同,热膨胀系数差异会导致内部连接松动或焊点开裂。强紫外线辐射则会加速所有暴露在外的有机材料(电缆外皮、油漆涂层、塑料外壳)的老化进程,使其变色、粉化、力学性能衰退,从而缩短设备使用寿命并增加维护频率。

2 高寒地区机电安装关键系统的材料选择策略

2.1 管道系统材料选择

在高寒地区,金属管道应优先选用具有良好低温

韧性的合金钢。奥氏体不锈钢（如304、316L）因其面心立方晶体结构，在极低温度下仍能保持优异的韧性，是输送低温介质（如液氮、LNG）或关键工艺管道的首选，但需注意其较高的成本和特定环境下的应力腐蚀开裂风险。低温碳钢（如ASTMA333Gr.6,GB/T18984L245NB）通过严格控制硫、磷等杂质含量，并进行正火或正火+回火热处理，可将韧脆转变温度降至-45℃甚至更低，性价比高，适用于大部分公用工程管道（给水、采暖、压缩空气等）。铝合金管道则因其密度小、耐腐蚀、低温性能好，适用于对重量敏感的场所，如航空、航天地面设施。对于非金属管道，应谨慎使用，并严格限定其应用范围。PE-RTII型（耐热聚乙烯II型）或PE100-RC（抗裂纹增长聚乙烯）等高性能聚乙烯材料通过分子结构优化，显著提升了低温抗冲击性能和慢速裂纹增长resistance，可用于低温热水地板辐射采暖系统。PP-RCT（改性聚丙烯）因其更高的结晶度，刚性和耐低温性优于普通PP-R，可在-20℃以上环境中用于冷热水系统。而PVC-U、普通PP-R等低温性能差的塑料管材则应绝对避免使用^[2]。所有管道材料均需明确标注其最低设计金属温度（MDMT），并确保其低于项目所在地的历史极端最低气温，这是保障系统安全运行的基本前提。

2.2 设备与阀门材料选择

机电设备（泵、风机、换热器等）及阀门的壳体、叶轮、阀芯等关键部件同样面临低温脆断风险。铸件应选用低温球墨铸铁（如ASTMA395）或低温碳钢铸件（如ASTMA352LCB/LCC），严禁使用普通灰口铸铁，因其片状石墨结构在低温下极易成为裂纹源。锻件则优先采用与管道同等级的低温碳钢或不锈钢锻件，以保证整体系统的材料性能一致性。密封材料作为动、静密封的薄弱环节，应选用氟橡胶（FKM）、全氟醚橡胶（FFKM）或聚四氟乙烯（PTFE）等能在-50℃以下保持弹性和密封性的材料。石棉、普通丁腈橡胶（NBR）等材料因低温下性能急剧劣化，应被淘汰，以防止因密封失效导致的泄漏事故。

2.3 电气与自控系统材料选择

在电气与自控系统方面，必须选用专用的耐寒电缆。其绝缘和护套材料通常为特殊配方的聚氯乙烯（耐寒PVC）、热塑性弹性体（TPE）或乙丙橡胶（EPR），产品标准应明确标有适用的最低温度（如-40℃、-60℃）。对于重要回路，可考虑采用矿物绝缘电缆（MICable），其铜护套和氧化镁绝缘在极端环境下依然可靠。电线导管与桥架应以金属导管（镀锌钢管、不锈钢管）为首选。若使用塑料导管，必须选用高密度聚乙

烯（HDPE）或改性聚丙烯（PP）等耐寒品种，并充分考虑其线膨胀系数，在长距离敷设时设置足够的伸缩节，以释放热应力。所有户外或未供暖区域的电气盘柜，其外壳材料（通常为不锈钢或覆铝锌板）和内部元器件（接触器、继电器、PLC模块等）均需具备宽温工作能力（如-40℃~+70℃）。必要时，盘柜内部应加装防凝露加热器和温控装置，以维持内部适宜的工作环境，确保控制系统稳定运行。

2.4 保温与保冷材料选择

对于高温或常温管道保温，可选用离心玻璃棉、岩棉等，但需确保其憎水性良好，防止吸湿后在冻融循环中失效。而对于低温管道保冷，则必须选用闭孔率高、导热系数低、吸水率极低的材料。硬质聚氨酯泡沫（PUR/PIR）和柔性泡沫橡塑（NBR/PVC）是主流选择。其中，PIR（聚异氰脲酸酯）比PUR具有更好的阻燃性和尺寸稳定性，更适合高寒地区的严苛要求^[3]。所有保冷层外必须设置严密的防潮隔汽层（如铝箔、不锈钢薄板）和坚固的外护壳，以隔绝外部湿气侵入，这是防止保冷层失效和管道腐蚀的根本保障。

2.5 结构支撑与紧固件材料选择

型钢与板材应与主工艺管道采用同等级的低温钢材，以确保整体结构在低温下的协调变形与承载能力。紧固件（螺栓、螺母、垫圈）必须使用与被连接件相匹配的低温用高强度螺栓（如ASTMA320B7/B8系列）。普通4.8级或8.8级螺栓在低温下极易发生脆断，不仅无法提供可靠的紧固力，反而可能成为系统失效的起点，因此在高寒工程中必须杜绝使用。

3 高寒地区机电安装工程施工适应性技术措施

3.1 施工组织与计划管理

科学规划施工窗口期是高寒地区施工成功的第一步。应尽可能将露天、高空、焊接等对温度敏感的作业安排在夏季或初冬、早春的日间气温较高时段，并建立详细的气象预警机制，遇极端寒潮天气立即停止相关作业，以规避不可控风险。在焊接、设备组装、仪表调试等关键作业区域，搭建保温棚，并配备暖风机、热风幕等设备，确保作业环境温度维持在材料和工艺允许的范围（通常不低于5℃），为高质量施工创造基本条件。所有进场材料，特别是金属材料，应在温暖的库内存放足够时间，使其温度回升至环境温度以上，避免“冷材料”直接暴露在更冷的室外导致表面结霜或加剧热应力。焊接前，对焊件进行局部预热是防止冷裂纹的必要手段，这不仅是工艺要求，更是质量控制的关键环节。

3.2 特殊焊接与连接工艺

焊接是机电安装的核心工序，也是高寒施工的最大难点。必须在模拟现场最低预期温度的条件下进行焊接工艺评定，验证所选焊接方法、材料、参数在低温下的可靠性，这是确保焊接质量的前提。严格的预热与层间温度控制是防止焊接冷裂纹的核心措施。预热不仅能去除表面湿气，更能减缓焊缝冷却速度，有利于氢的逸出。必须使用接触式测温仪精确监控预热温度和层间温度，确保工艺参数的严格执行。焊接完成后，立即用保温棉（如石棉布、陶瓷纤维毯）包裹焊缝，使其缓慢冷却，进一步降低残余应力，完成氢的扩散，这一后热与保温缓冷过程对保证焊缝韧性至关重要^[4]。在条件允许的情况下，可推广使用沟槽连接、法兰连接等机械连接方式，减少现场焊接量，从而提高施工效率和质量可控性，降低对恶劣环境的依赖。

3.3 设备吊装与就位

设备吊装与就位过程同样需要针对高寒环境进行特殊安排。起重机、卷扬机等施工机械的润滑油、液压油必须更换为低温型号（如L-HV低温液压油），确保在-30℃以下仍能保持良好流动性，保障机械设备的正常运转。低温会使钢丝绳变脆，使用前必须仔细检查是否有断丝、磨损；尼龙吊带等合成纤维吊索的额定载荷在低温下会降低，需按厂家提供的修正系数使用，以确保吊装安全。在冻土区，设备基础必须置于持力层以下，或采用桩基础穿透冻土层，防止因冻胀或融沉导致设备倾斜、位移，这是保证设备长期稳定运行的基础。

3.4 系统试压、冲洗与调试

系统试压、冲洗与调试是工程收尾的关键阶段，其方法必须适应高寒特点。严禁在冬季使用水进行系统试压，应采用气压试验，或使用防冻液（如乙二醇水溶液）作为试压介质。若采用气压试验，需格外注意安全，必须有周密的防护措施。水冲洗后必须立即用干燥、无油的压缩空气或氮气彻底吹干系统，不留任何积水死角，以防止残留水分在低温下结冰膨胀，损坏管道

或设备。系统初次启动时，应采取逐步升温、升压的方式，让材料和系统有一个适应过程。对于电气系统，可先在盘柜内加温，待内部温度正常后再上电调试，这种分阶段、预加热的调试策略能有效避免因温度骤变导致的设备故障。

4 结语

本文通过系统分析高寒环境对材料的劣化机理，提出了覆盖管道、设备、电气、保温等全系统的精细化材料选择策略，并配套制定了从施工组织、焊接工艺到系统调试的全过程适应性技术措施。只有坚持“材料先行、工艺匹配、管理精细”的原则，才能从根本上保障高寒工程机电系统的本质安全与长期可靠。展望未来，高寒地区机电工程技术的发展将呈现以下趋势：一是新材料研发与应用，开发成本更低、综合性能更优的新型低温合金、高分子复合材料及智能保温材料；二是预制化与模块化，将更多工作转移到工厂内的受控环境中完成，现场仅进行组装，最大限度减少恶劣环境对施工质量的影响；三是数字化与智能化，利用BIM技术进行施工模拟与碰撞检查，应用物联网传感器对关键节点的温度、应力进行实时监测，实现预测性维护。

参考文献

- [1]戴家宏.机电设备安装施工质量的全过程管理与持续改进[C]//《中国招标》期刊有限公司.新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛——绿色智造·采购革新专题（第二册）.南京恒柄运机电设备工程有限公司,2025:11-15.
- [2]易刚,刘鹏吉,赵静.建筑机电工程安装施工质量控制措施探析[J].产品可靠性报告,2025,(10):73-74.
- [3]冯彦利.建筑机电安装施工技术创新与应用[J].产品可靠性报告,2025,(10):249-250.
- [4]仝辉跃.智能建筑机电安装工程施工及质量控制探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(29):72-74.