

大型空分装置低温管道设计与运用研究

——基于低温管道的材质与布置分析

李越超 张玉鑫（安徽华东化工医药工程有限责任公司洛阳分公司，河南 洛阳 471000）

摘要：本文针对大型空分装置中低温液氧、液氮管道的设计难点，结合工程实例，系统分析了低温管道的材料选择、保冷结构设计及管道布置原则。重点探讨了奥氏体不锈钢的低温适应性、低温管道阀门设计注意事项及保冷结构的对比与选择，为同类的低温管道优化设计提供参考。

关键词：空分装置；低温管道；材质；液氧；液氮

1 引言

大型空分装置是化工、冶金等行业的核心设备，其低温管道系统（液氧温度 -183℃、液氮温度 -196℃）的运行安全直接影响装置效率与可靠性。低温管道需承受极端温度、相变压力波动及潜在氧燃烧风险，因此材质选择与布置设计是工程关键。

2 低温管道材质选择

2.1 材料低温性能要求

①低温韧性：避免冷脆现象（材料在低温下韧性骤降）。②耐腐蚀性：液氧具有强氧化性，需避免与碳钢等材料反应。③热膨胀系数：需与保冷层及支撑结构匹配。

2.2 常用材料对比

液氧、液氮等低温管道的选材主要分为几类，表1针对工程设计中常用的几类材质进行了分类对比。

氧气管道的材质选用参照《氧气站设计规范》（GB50030—2013）中第11.0.9条款中的表进行。液氧管道的材质通常选用不锈钢无缝钢管（GB/T14976—2012）；氧气管道的材质除氧气充装台、汇流排和阀后5倍公称直径处选用铜及铜合金拉制管（GB/T1527—2006），其余位置的管道均可选用不锈钢无缝钢管，依据以往的工程经验液氧管道建议优先选用316L不锈钢，因其高铬镍含量抑制氧化腐蚀；液氮管道304不锈钢可满足常规需求，但需注意焊接接头低温冲击试验，焊接的管子和管件应进行低温冲击试验。

3 低温管道布置设计要点

3.1 应力补偿设计

在空分装置中主要应避免泵、压缩机和排气管道的震动，在设计管路时通过运用CAESARII软件对管道进行应力计算分析可以有效的避免此类情况的发生，对于低温液体管道较常见的方法就是利用通过改变管道走向增加管道的补偿能力，提高管道系统的柔性，工程实例中多采用L型或Π型补偿；另外当使用场合受限或条件不允许的情况也可采用膨胀节或金属软管，一般在低温泵的进出口为了减少管道振动，避免疲劳度断裂，多采用金属软管连接来保证管道系统的稳定以及设备正常运行。

3.2 管道布置原则

低温液体管道设计应注意以下几点：
管道按介质流向应相应的坡度，保持流动避免积聚，保持坡度 $\geq 2\%$ ，管道系统低点设置排液阀。管道布置应尽量避免袋型布置；氧浓度大于20%的低温液体管线中易含有微量碳氢化合物，若此液体积聚会有爆炸风险。正常操作工况下，长期处于关闭的阀门上下游即为潜在的爆炸危险源，对装置的生产安全造成威胁。例如后备系统液氧泵入口侧排液阀门上游，因富氧液被封堵在管道盲端并且不断有新的低温液体流入，由于阀门的与外界不可避免的热量传递，造成液体汽化，从而造成低温液体在阀门单侧或者两侧产生连续的气化，低温液体沸腾后会造成碳氢化合物不

表1

序号	材质类型	适用温度范围(℃)	优势	局限性
1	304/316L 不锈钢	-196~400	低温韧性优异，耐腐蚀	成本较高
2	铝合金	-269~150	轻量化，导热性低	焊接工艺复杂
3	镍基合金（如 Invar）	-270~200	超低热膨胀系数	价格昂贵，加工困难

断积聚增加危险情况发生概率，所以此类管线布置应注意阀门的位置设置，避免死区。

低温液体管道应合理规划路径，管道走向最短化，弯头数量最小化。尤其是在泵的进口管道的设计，应尽量的短且直，可有效避免因积聚造成气化引起的泵气蚀的风险。低温泵入口管道、回气管道、返回线应根据泵的结构和型式进行合理设计，如立式泵的气相返回线应倾斜向上保证回气流畅，尽量避免弯头，减小管道阻力损失，避免气阻造成回气不畅形成设备超压；卧式低温泵进口管道不超过5m，若进口管道使用真空管道或泵箱保冷时可适当放宽长度要求，泵入口管道应从储槽底部出液口一路向下坡向泵入口，坡度建议大于10%。

低温阀门宜安装在水平管道上，阀杆方向宜垂直向上，偏置时与水质方向夹角不应大于45°，防止阀门关闭后，阀腔内残留一些液体，液体气化造成异常升压，闸板无法开启，而且低温的阀杆较长，安装时应引起重视。有泄压孔的低温闸阀，应在阀体上标记泄压孔方向，并注意标记不应被保冷层覆盖。

除材料变化、仪表连接、维修要求等必须设置法兰连接外，管道宜采用焊接连接。

阀门、法兰等需要检修处应设置合理的保冷结构，减少冷损，便于检修。另需要注意的是低温阀门保冷结构设置也是需要注意的。低温阀门的一个最显著的特点就是其阀盖一般为长颈结构，在GB/T 24925《低温阀门技术条件》中也有明确规定“低温闸阀、截止阀、球阀、蝶阀的阀盖应根据不同的使用温度要求设计成便于保冷的长颈阀盖结构，以保证填料函底部的温度保持在0℃以上”。加长阀盖结构的设计主要是为了使阀门操作手柄和填料函结构远离低温区，既可以避免温度太低造成操作人员冻伤，也可以保证填料函和压套在正常的温度下使用，防止填料的密封性能降低，延长填料的使用寿命。因为在低温状态下随着温度的降低，填料弹性逐渐消失，防漏性能随之下降，由于介质渗漏造成填料与阀杆处结冰，影响阀杆正常操作，同时也会因阀杆上下移动而将填料划伤，引起严重泄漏。所以低温阀门必须采用长颈阀盖结构形式。此外，长颈结构还便于缠绕保冷材料，防止冷能损失。由于低温管道一般有着较厚的保冷层厚度，长颈阀盖便于保冷施工，并使填料压盖处于保冷层外，有利于需要时随时紧固压盖螺栓或添加填料而无需损坏保冷层。在进行长度选用时除了要满足BS、MSS SP等标

准和设计单位的特殊要求外，还需考虑设计保冷层厚度是否大于该长度，如是则应加长以和保冷厚度匹配；滴水盘结构的设置，由于阀门内传递是低温介质，为了避免或减少介质温度向阀杆及其上端的填充材料传递，防止这些材料因冻结而失效，可在阀门中增加滴水板结构。一些研究机构对这种带有滴水板结构的阀门进行了实验验证，并证明了带有滴水板的阀门阀盖上端温度较高。由于延长阀盖上部的温度较低，通常情况下阀门暴露在空气中，空气中的水蒸气遇到低温阀盖会液化成水珠，滴水板的直径超过中法兰直径，可以防止低温液化的水蒸气滴落在中法兰螺栓上，避免螺栓锈蚀影响在线维修。

3.3 保冷设计

液氧(-183℃)、液氮(-196℃)、液氩(-185.9℃)等低温液体存储和运输都需要特别的防护条件，保冷材料的性能、保冷效果、安装性能、设施成本及维护成本等不仅关系整个装置工艺管道的装置能耗和效率，而且对企业安全和生产效率等也有重大的影响作用。适合的保冷材料、合理的保冷结构及高质量的施工对降低能耗、减少冷量损失有着重要的作用，同时也能为企业提供安全生产，保证企业的收益。

保冷性能主要取决于保冷结构材料的选择、保冷结构的设计、保冷计算。

绝热材料的品种繁多，有聚异氰尿酸酯PIR/聚氨酯PUR、泡沫玻璃FG、丁腈橡胶二烯烃复合材料(LT+LTD)等；聚异氰尿酸酯PIR/聚氨酯PUR是多元醇与异氰酸酯等当量反应生成泡沫塑料，PIR是英文polyisocyanurate聚异氰脲酸酯的缩写，是一种含有典型碳氮六元刚性杂环特征结构的泡沫塑料。PIR是异氰酸酯过量反应，异氰酸酯加入特殊金属盐催化剂不添加多元醇即可与发泡剂反应生成泡沫，只不过因脆性太大无实用价值，所以人们通过改性即加入低羟值多元醇以改善泡沫脆性，由于其耐低温性、耐热性好，PIR泡沫能在-196℃~+160℃长期连续使用，尺寸变化率<1%；聚氨酯硬质泡沫塑料，若在此温度长期使用，强度明显下降，外观与尺寸也发生变化。PIR耐火焰贯穿性好厚度为2.5cm左右的聚异氰脲酸酯泡沫塑料板，用丙烷火焰对着它的一侧中心燃烧，30min左右才能把泡沫塑料板烧穿。高密度聚异氰脲酸酯泡沫塑料和加入无机填料的品种，火焰贯穿时间更长，甚至可达几小时。聚氨酯硬质泡沫塑料，在同等条件下，一般几分钟就烧穿了。由于聚氨酯的

阻燃性取决于它的化学组成和结构，因此，聚氨酯通过配方调整能显著提高其阻燃性能，以满足消防安全的标准。高性能泡沫玻璃是一种以纯玻璃为原料，掺入适量发泡剂，通过高温隧道窑炉发泡，经退火冷却加工处理后制得，具有均匀的独立密闭气孔结构的新型无机绝热材料；它具有密度小重量轻，导热系数低，抗压强度大可以用于管道、设备保温和储罐底部的承重和隔热。丁腈橡胶二烯烃复合材料（LT+LTD）为进口品牌阿乐斯的“LT 低温弹性体”材料，属于合成橡胶发泡材料的一种，是专门为 0~200℃ 低温管道和设备保冷应用而开发的绝热材料。材料不含 CFC，是一种比较环保的保温材料；完全非金属绝热系统，弹性闭泡，导热系数低且长期稳定，防结露、结冰效果好，阻燃性能好，保冷厚度比传统材料薄，但材料成本较高。

保冷结构设计根据所选材料的不同，有不同的保冷结构。保冷结构由内到外，按功能和层次由防锈层、保冷层、防潮层、外保护层、防腐蚀及识别层构成。防锈层是保冷结构的内层，将防锈材料敷设在保冷设备及管道采用碳钢或铁素体合金钢外壳的外表面，防止其因受潮而腐蚀生锈。而保冷设备及管道在采用不锈钢、有色金属及非金属外壳时不存在生锈腐蚀问题，也就不需设置防锈层；绝热层是保冷结构的核心层，将绝热材料敷设在保冷设备及管道外表面，阻止外部环境的热流进入，减少冷量损失，维持保冷功能。防潮层是保冷层的维护层，将防潮材料敷设在保冷层外，阻止外部环境的水蒸汽渗入，防止保冷层材料受潮后降低保冷功效乃至破坏保冷功能。保护层是保冷结构的维护层，将保护层材料敷设在保冷层或防潮层外部，保护保冷结构内部免遭水分侵入或外力破坏，使保冷结构外形整洁、美观，延长保冷结构使用年限。防腐蚀及识别层是保冷结构的外层，在保护层外表面涂刷防腐漆，采用不同颜色的防腐漆或制作相应色标，以识别设备及管道内介质类别和流向，故防腐层亦兼作识别层。

保冷计算的目的是确定绝热层材料的选定类别品种及其所需要的厚度，通常为减小冷损时需要的保冷厚度，宜按经济厚度法进行计算，为维持绝热层的保冷效果，保冷计算的另一项内容是防止绝热层保冷材料受潮，这一方面要防止绝热结构表面不结露，即采用防结露的保冷厚度计算；另一方面也要阻止外部水蒸气向绝热层保冷材料内部渗透，即确定其防潮层阻止水蒸汽渗透的能力。此外，我国有关标准已对保冷与保温分别制订了允许最大冷(热)损失的规定、也

是在计算绝热层厚度时需要遵循的。根据 GB 50264《工业设备及管道绝热工程设计规范》保冷层厚度需满足表面不结露且投资回收期≤5 年，并用热平衡法核定；保冷结构外表面不应结冰、结霜，外表面温度应高于环境露点温度 1~3℃；在安装绝热之前，所有的管道和管件应焊接完成并经过水压试验和气压试验。管道表面应不含油脂、灰尘等其他杂质。管道表面应进行防潮处理，并充分晾干。绝热材料应放在防潮、防紫外线、不易损坏的地方，需要保证绝热材料保存良好、干燥无污染性。保冷层应厚薄均匀、接缝严密、紧固合理、松紧适度、确保绝热效果良好。

另外真空绝热管也是低温管道选择中较常见的一种形式，真空绝热管需分段预制，在长输管线及储运系统中应用广泛。

4 典型工程案例分析

4.1 某 10 万 Nm³/h 空分装置液氧管道泄漏事故

经现场人员对装置管道进行勘察，发现泄露点管道弯头处因焊接杂质引发低温脆裂，此段管道材质为 304 不锈钢，后将此段管道材料升级为 316L，采用自动氩弧焊工艺，焊后 100% 射线检测，泄露事故得到了有效的控制。

4.2 保冷材料升级

河南省开封市某大型化工企业 80000Nm³/h 空分装置液氧管道保冷材料由原有聚氨酯材料更换真空管道，管道冷损降至 5%，年节约能耗 120 万 kWh。有效的降低了因保冷不到位造成的气化放空损失。

5 结论与展望

随着石油化工装置的大型化、自动化水平不断提高、生产装置多样化、产业逐步深化的趋势下，如何在保证安全生产降低能耗、节省投资成为一个重要问题，低温阀门、低温管道设计需综合考虑材料性能、热应力补偿及安全防护。近年来市场上也对应出现了如多种新型保冷材料，在少数工程应用中也取得了一定的效果，但其成本较高，维护也有一定难度，在未来还是期待有更多的节能降耗的新技术可以更好辅助装置的运行。

参考文献：

- [1] 李志强. 空分设备低温管道保冷技术研究 [J]. 深冷技术, 2020(12):151-152.
- [2] GB/T 20801.2-2020. 压力管道规范 工业管道 [S]. 北京: 国家市场监督管理总局, 2020.
- [3] GB 50264-2013. 工业设备及管道绝热工程设计规范 [S]. 北京: 中国工程建设标准化协会化工分会, 2013.