

# 空气分离装置管道设计风险分析与安全对策研究

巨小虎<sup>1</sup> 吴松治<sup>1</sup> 冶小军<sup>2</sup>

1. 黑龙江龙维化学工程设计有限公司杭州分公司 浙江 杭州 310000

2. 杭州良环科技有限公司 浙江 杭州 310000

**摘要:** 在工业气体生产中,空气分离装置是核心,其管道设计的安全与稳定对生产流程意义重大。本文聚焦于此,深度融合信息系统理念与技术,全方位剖析管道设计风险。一方面,从工艺参数、材料选择等角度系统识别潜在风险,如压力、温度异常及材质不匹配等问题;另一方面,借助信息系统建立风险数据库、构建评估模型,进而提出针对性安全对策,包括优化设计方案、加强材料管理等,以提升空气分离装置安全性与稳定性,为工业安全、高效生产提供坚实保障。

**关键词:** 空气分离装置;管道设计;风险分析;安全对策

## 引言

在当今工业现代化飞速发展的浪潮中,空气分离装置已成为化工、冶金、电子等众多关键行业不可或缺的核心设备,它运用复杂精密工艺分离提纯空气中的氧气、氮气等气体,为各行业提供关键气体原料。管道作为连接装置各部分的关键纽带,其运行状态直接关联整个装置的安全稳定,从低温液态到高压气态的气体输送都依赖于它。当前部分空气分离装置在管道设计阶段对风险把控不足,传统设计侧重基本工艺而忽视潜在风险,随着工业技术进步,装置规模和复杂性增加,对管道设计安全性要求更高,因此,基于信息系统思维,利用大数据、人工智能等技术进行风险分析与安全对策研究,对保障工业安全生产、推动行业可持续发展意义重大。

## 1 空气分离装置管道设计风险识别

### 1.1 工艺参数相关风险

**压力风险:** 管道内气体压力是影响管道安全运行的关键因素之一。当管道内气体压力过高时,管道将承受巨大的应力,一旦超过其耐压极限,哪怕是极其微小的管道缺陷,都可能成为引发管道爆裂的导火索。以高压氧气输送管道为例,氧气具有强氧化性和助燃性,一旦发生泄漏,遇到明火或高温源,极易引发剧烈爆炸,造成严重的人员伤亡和财产损失。在实际生产中,由于压力调节系统故障、操作失误等原因,导致压力瞬间升高的情况时有发生,给安全生产带来极大隐患。

相反,若管道内气体压力过低,虽然不会直接引发爆炸等严重事故,但会严重影响气体的输送效率,无法满足生产工艺对气体流量和压力的严格要求<sup>[1]</sup>。在冶金行业,氧气作为炼钢过程中的重要氧化剂,其供应压力和流量的稳定性直接关系到钢材的质量和生产效率。如

果氧气管道压力不足,会导致炼钢过程中氧化反应不充分,影响钢液的质量和成分均匀性,进而降低钢材的性能和品质。

**温度风险:** 空气分离过程涉及复杂的物理变化,气体温度在不同阶段会发生显著变化,这给管道设计带来了严峻挑战。对于低温管道,如液氧、液氮等低温液体输送管道,若设计不合理,管道材料在低温环境下容易出现冷脆现象。冷脆现象会使管道材料的韧性急剧下降,变得如同玻璃般脆弱,即使承受较小的外力也可能发生脆性断裂。一旦液氧管道发生脆性断裂,液氧将迅速泄漏,在常温环境下迅速汽化,体积急剧膨胀,可能引发物理爆炸,同时液氧的强氧化性还可能引发二次火灾事故。

而对于高温管道,由于气体在压缩、换热等过程中会产生高温,管道材料会因热膨胀而发生尺寸变化。如果管道设计时没有充分考虑热膨胀因素,随着温度的反复变化,管道会逐渐变形,连接处的密封性能也会受到影响,导致气体泄漏。例如,在空气分离装置的压缩机出口管道,气体温度较高,若管道的固定支架设置不合理,无法有效吸收热膨胀产生的应力,就会导致管道弯曲、变形,甚至出现裂缝,从而引发气体泄漏事故。

### 1.2 管道材料选择风险

**材质不匹配:** 不同性质的气体对管道材料有着截然不同的要求。氧气具有强氧化性,普通碳钢管道在氧气环境中极易发生氧化腐蚀。氧化腐蚀不仅会使管道内壁逐渐变薄,降低管道的强度和耐压能力,还会产生铁锈等杂质,这些杂质可能会进入气体输送系统,影响气体的纯度和质量。在电子行业,对高纯度氮气的要求极高,若输送氮气的管道材料杂质含量过高,即使是微量

的杂质也可能会污染氮气，导致电子产品的质量下降，甚至出现废品。因此，根据不同气体的特性选择合适的管道材料至关重要。

**质量问题：**使用质量不合格的管道材料是管道安全运行的重大隐患。一些小厂家生产的管道可能存在壁厚不均匀、内部存在砂眼、气孔等缺陷，这些缺陷会使管道在承受气体压力时，受力不均，薄弱部位容易发生破裂。焊接缺陷也是常见的质量问题之一，如焊缝不牢固、存在虚焊、夹渣等情况，在高压气体的长期冲击下，焊缝处极易开裂，导致气体泄漏。此外，部分管道材料的实际性能可能与标称性能存在差异，如材料的屈服强度、抗拉强度等不达标，这也会降低管道的安全性和可靠性。

## 2 基于信息系统的风险分析方法

### 2.1 建立风险数据库

借助信息系统强大的数据存储和管理功能，搭建专门针对空气分离装置管道设计的风险数据库。该数据库广泛收集各类空气分离装置管道设计风险案例，涵盖事故发生的时间、具体地点、事故原因、造成的直接和间接经济损失以及人员伤亡情况等多维度信息。对收集到的风险案例按照工艺参数风险、材料选择风险、施工安装风险、运行维护风险等不同类别进行细致分类存储，为后续的风险分析和研究提供全面、准确的数据支撑<sup>[2]</sup>。

通过对历史数据的深入挖掘和分析，运用数据分析和机器学习算法，可以总结出不同风险发生的概率和影响程度。例如，经过对大量案例的分析发现，因管道材料质量问题导致的事故占比高达30%，且这类事故造成的平均经济损失超过500万元，远远高于其他类型的事故。这些数据为风险评估和决策提供了有力依据，使我们能够更加清晰地认识到各类风险的危害程度，从而有针对性地制定防范措施。

### 2.2 风险评估模型构建

运用信息系统中的数据分析算法，结合空气分离装置管道设计的特点和实际运行情况，构建科学合理的风险评估模型。该模型充分考虑管道压力、温度、材料特性、运行时间、施工质量、维护保养情况等多种因素，通过专家经验和数据分析相结合的方法，对每个因素赋予相应的权重。例如，对于压力因素，由于其对管道安全的影响较大，赋予较高的权重；而对于运行时间因素，虽然其对风险的影响相对较小，但也不容忽视，赋予适当的权重。

通过模型计算，可以得出管道设计在不同工况下的风险等级。当管道压力接近耐压极限、材料老化严重、

运行时间较长且维护保养不到位时，模型会自动评估为高风险等级。此时，系统会及时向设计人员和操作人员发出预警信息，提醒他们重点关注该管道的运行状态，提前采取相应的防范措施，如加强巡检频次、进行压力监测和调整、更换老化的管道材料等，以降低风险发生的可能性。

## 3 空气分离装置管道设计安全对策

### 3.1 优化设计方案

**合理规划管道布局：**根据空气分离装置的工艺流程和设备布局，运用先进的计算机辅助设计（CAD）技术，对管道走向进行合理规划。在规划过程中，充分考虑气体的流动特性和压力损失，尽量减少不必要的弯头和阀门，降低气体输送阻力，提高输送效率。同时，合理安排管道的空间位置，避免管道之间的交叉和重叠，防止因管道相互碰撞、摩擦或热辐射影响而导致的安全隐患。在空间有限的装置内，通过优化管道布局，可以有效避免管道之间的干扰，提高装置的安全性和可靠性。

**精准计算工艺参数：**运用专业的流体力学计算软件和热工计算软件，结合生产实际需求，对管道的压力、温度、流量等工艺参数进行精准计算。在计算过程中，充分考虑管道的材质、管径、长度、粗糙度等因素对工艺参数的影响，确保计算结果的准确性。根据计算结果，选择合适的管道规格和型号，如管径、壁厚、管材等，确保管道在设计工况下能够安全、稳定地运行<sup>[3]</sup>。例如，在设计高压氮气管道时，通过精确计算管道的压力损失和流量需求，选择合适的管径和壁厚，既能保证氮气的正常输送，又能确保管道的安全可靠。

### 3.2 加强材料管理

**严格材料选型：**依据不同气体的性质和工艺要求，制定严格的管道材料选型标准。对于氧气管道，优先选用不锈钢、铜合金等耐腐蚀、抗氧化性能好的材料。例如，304不锈钢相较于普通碳钢，在氧气环境下抗氧化能力提升数倍，能极大延长管道使用寿命。对于低温管道，采用铝合金、低温钢等具有良好低温韧性的材料；对于腐蚀性较强的气体管道，选用耐腐蚀性强的非金属材料或内衬防腐材料的金属管道。在材料选型过程中，充分考虑材料的成本、加工性能、使用寿命等因素，在保证安全的前提下，选择性价比高的材料。通过对不同材料全生命周期成本分析，在满足安全要求下，挑选出最具经济效益的方案。

**把控材料质量：**建立完善的质量检验制度，从材料采购源头开始严格把关。对采购的管道材料进行全面的检测，包括化学成分分析、力学性能测试、无

无损探伤检测等。化学成分分析主要检测材料的元素组成是否符合标准要求,如对不锈钢材料重点检测铬、镍等元素含量。力学性能测试包括拉伸试验、冲击试验、硬度测试等,以确保材料的强度、韧性等性能指标满足设计要求<sup>[4]</sup>。无损探伤检测则采用超声波探伤、射线探伤等方法,检测管道内部是否存在缺陷,不放过任何细微瑕疵。只有经过严格检验合格的材料才能用于管道安装,坚决杜绝质量不合格材料进入施工现场。

#### 4 安全对策实施案例分析

##### 4.1 化工企业应用实例

大型化工企业拥有一套规模较大的空气分离装置,在装置运行过程中,频繁出现管道泄漏问题。经过初步排查,发现部分管道材料因长期受到腐蚀性气体的侵蚀,出现了严重的腐蚀现象,管道壁厚明显减薄,部分区域甚至出现了穿孔。同时,管道布局存在不合理之处,部分管道在运行过程中承受的压力过大,导致管道变形、开裂。例如,在一次常规巡检中,技术人员发现一处液氧输送管道的外壁出现了多处锈斑,经过进一步检测,壁厚已从原本的8毫米减薄至3毫米,部分位置甚至出现了直径约2厘米的穿孔,随时可能引发严重的安全事故。另外,在气体压缩区域,由于管道走向设计不合理,部分管道在高压气体的冲击下,承受的压力远超设计标准,出现了明显的变形和裂缝。

针对这些问题,企业运用上述风险分析方法,对空气分离装置管道系统进行了全面的风险评估。根据评估结果,制定了详细的安全对策实施方案。首先,对腐蚀严重的管道进行了更换,选用了耐腐蚀性能更好的不锈钢材料。其次,重新规划了管道布局,优化了管道走向,减少了不必要的弯头和阀门,降低了管道的压力损失和受力不均的情况。此外,企业还建立了基于信息系统的风险监测机制,实时监测管道的压力、温度、流量等参数,及时发现潜在的安全隐患。

##### 4.2 实施效果评估

实施安全对策后,该企业空气分离装置管道泄漏事故发生率显著降低,从每年5次降至1次以内。气体输送效率得到了大幅提高,提高了20%,有效满足了生产工艺

对气体流量和压力的要求。生产稳定性大幅提升,减少了因管道故障导致的停产次数和停产时间,每年节约维修成本30万元。据统计,在实施安全对策前,因管道故障导致的停产时间每年累计达到30天,严重影响了企业的生产进度和经济效益。而实施后,停产时间缩短至5天以内,保障了生产的连续性。同时,由于管道泄漏事故的减少,企业的安全生产环境得到了明显改善,员工的工作安全感增强,为企业的可持续发展奠定了坚实基础。

#### 结语

空气分离装置管道设计风险分析与安全对策研究对于保障工业安全生产具有不可估量的重大意义。通过全面、系统的风险识别,借助基于信息系统的先进风险分析方法,以及针对性强、切实可行的安全对策的有效实施,能够显著降低空气分离装置管道设计中的风险,提高装置的安全性和稳定性。

实际案例充分证明了这些风险分析方法和安全对策的可行性和有效性,为其他企业提供了宝贵的借鉴经验。然而,随着工业技术的不断创新和发展,空气分离装置的规模和复杂性将持续增加,新的风险因素也可能随之出现。因此,未来需要持续关注空气分离装置管道设计领域的发展动态,不断完善风险分析与安全对策体系,加强技术研发和人才培养,确保空气分离装置在安全、稳定的前提下高效运行,为工业生产的蓬勃发展提供有力保障。

#### 参考文献

- [1]元达惠,孙杰.基于风险的检验技术在空气分离装置容器和管道上的应用[J].石油化工腐蚀与防护,2020,37(5):49-52.DOI:10.3969/j.issn.1007-015X.2020.05.013.
- [2]杜凌云.空气分离装置PBU系统的工程设计[J].化工管理,2021,(12):84-86.DOI:10.19900/j.cnki.ISSN1008-4800.2021.12.040.
- [3]刘九竹,孙沛,唐玮.化工管道设计风险和优化方法分析[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(13):17-19.
- [4]李政.化工工艺管道设计风险分析与安全对策研究[J].山东化工,2024,53(02):194-195+200.DOI:10.19319/j.cnki.issn.1008-021x.2024.02.021.