

浅析氧气管道及阀门选材

孙蕴菡 孙宇婷 (中石油吉林化工工程有限公司, 吉林 吉林 132000)

摘要: 随着我国化工行业发展走向成熟,越来越多的化工行业从业相关工作人员开始意识到化工管道设计中的材料选用对于化工行业发展的重要作用。本文简单阐述了管道材料的选材依据,并针对氧气介质的管道选材和阀门选材进行了进行了简单概述。希望能够为氧气管道的材料选用探讨研究分析提供新的参考思路。

关键词: 氧气管道设计; 管道材料; 设计

中图分类号: TE8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 029-0079-03

Analysis of oxygen pipeline and valve material selection

Sun Yunhan, Sun Yuting (CNPC Jilin Chemical Engineering Co., Ltd., Jilin 132000, China)

Abstract: With the mature development of China's chemical industry, more and more related staff in the chemical industry begin to realize the important role of material selection in chemical pipeline design for the development of the chemical industry. This paper briefly expounds the selection basis of pipeline materials, and summarizes the pipeline and valve materials of oxygen medium. It is hoped to provide new reference ideas for the research and analysis of the material selection of oxygen pipeline.

Key words: oxygen pipeline design; pipe materials; design

1 管道材料概述

化工行业所使用的原料介质一般都具有一定的危险性(如易燃易爆、腐蚀性强等危险因素),因而在选择管道材料时需要有较强的抗腐蚀性、抗氧化性,不易燃易爆且适应环境的能力要强的材料,从而降低管道破裂的风险,避免安全事故的发生,因而化工管道设计中的材料选用对于化工行业发展起到了重要的作用。

管道材料的选择主要针对于以下这些管道件如:管子、管件(包括弯头、三通、异径管、短管、八字盲板、插板、垫环、短管、管箍等)、垫片、法兰、阀门、紧固件以及其他辅助材料。选择管道材料主要参考文件包含:管道材料设计说明(包括材料标准、检测标准、尺寸标准、规定管道材料的单位尺寸、材质、检验、公差等内容)、等级索引表(对介质压力、温度、等级材料等按照不同等级进行简要的阐述)、材料等级表(明确规定了管道元件的标准规范、尺寸范围、材料牌号以及特殊型号等技术参数)、壁厚表(对所有不同口径的管子规定了壁厚值)以及分支表(明确的规定了主管与支管不同连接方式)等文件组成。

2 管道材料的选择依据

介质的特点如:易爆性、毒性、易燃性及腐蚀性。介质的工作参数,重点在于设计温度以及压力等方面的参数,以满足现阶段需求。

综合因素的影响,影响管道材料的质量的因素有很多,如化学性能、物理性能、机械性能、热处理性能、焊接性能等,此外还需要考虑经济性与环保性以满足实际的需求。

3 氧气管道材料的选用阐述

氧气是一种强氧化性的助燃性气体(本身不可燃),在工业、医疗、化工、航空航天等领域有着广泛的应用,在高压下,氧气与油脂、金属粉末等可燃物接触易引发自然或爆炸。因此,化工行业从业相关人员进行氧气输送时,氧气管道内部不存在其他气体或液体,且需要进行脱脂处理,其目的是为了防止管道内的油脂等有机物与管道内输送的介质接触,造成不必要的危害或危险。

3.1 氧气管道的着火机理

欧洲工业气体协会(EIGA)颁布的 IGC Doc13/12/E 标准中氧气管道的着火机理如下:①颗粒物冲击点

表1 管道中氧气最高允许流速(《GB16912-2008 氧气及相关气体安全技术规程》)

材质名称	工作压力 P/MPa					
	$p \leq 0.1$	$0.1 < p \leq 1.0$	$1.0 < p \leq 3.0$	$3.0 < p \leq 10.0$	$10.0 < p \leq 15.0$	$p > 15.0$
碳钢		20m/s	15m/s	不允许	不允许	不允许
奥氏体不锈钢	根据管系压降确定	30m/s	25m/s	$p \times v \leq 45\text{MPa} \cdot \text{m/s}$ (撞击场合)	4.5m/s (撞击场合)	4.5m/s
				$p \times v \leq 80\text{MPa} \cdot \text{m/s}$ (非撞击场合)	8.0m/s (撞击场合)	

燃；②绝热压缩；③材料自然（金属自燃或非金属自燃）；④摩擦 / 机械火花；⑤静电放电。

3.2 氧气管道的流速要求

GB16912-2008《深度冷冻法生产氧气及相关气体安全技术规程》中规定，最高允许流速为该管道系统工况中的最低工作压力、最高工作温度时所对应的实际流速，不同材质的管道内氧气的最高流速不得超过表 1。

而 GB 50030-2013《氧气站设计规范》规定的氧气流速如表 2 所示。

表 2 管道中氧气最高允许流速（《氧气站设计规范》（GB 50030-2013））

材质	工作压力 P/MPa					
	p≤0.1	0.1<p≤1.0	1.0<p≤3.0	3.0<p≤10.0	10.0<p≤15.0	p>15.0
碳钢		20m/s	15m/s	不允许	不允许	不允许
奥氏体 不锈钢	根据管系 压降确定	30m/s	25m/s	p×v≤45MPa·m/s (撞击场合)	4.5m/s (撞击场合)	4.5m/s
				p×v≤80MPa·m/s (非撞击场合)	8.0m/s (撞击场合)	

注 1：最高允许流速是指管道最低工作压力，最高温度时的实际流速。

注 2：撞击场合和非撞击场合：使流体流动方向突然改变或产生漩涡的位置，从而引起流体中颗粒对管壁的撞击，这样的位置称作撞击场合；否则称为非撞击场合。

注 3：钢及铜合金（含铝铜合金除外）、镍及镍铜合金，在小于或等于 21.0MPa 条件下，流速在压力降允许时没有限制。

表 2 氧气管道内的最高流速（《氧气站设计规范》（GB 50030-2013））

设计压力（MPa）	管材	最高允许流速（m/s）
≤ 0.1	—	按管道系统允许压力降确定
> 0.1，且 ≤ 1.0	碳钢	20
	不锈钢	30
> 1.0，且 ≤ 3.0	碳钢	15
	不锈钢	25
> 3.0，且 ≤ 10.0	碳钢	4.5
	不锈钢	4.5
> 10.0，且 ≤ 20.0	铜基合金	6

GB16912-2008《深度冷冻法生产氧气及相关气体安全技术规程》及 GB 50030-2013《氧气站设计规范》规定在压力为 3MPa 以上及 15MPa 以下对氧气在奥氏体不锈钢中的流速以及在压力为 21.0MPa 以下氧气在铜基合金中的流速有不同的要求，使用时一般选择更为严格的标准执行。

3.3 管道选材总体原则

氧相容性：材料需通过 ASTM G94 或 ISO 14114 等标准的氧相容性测试，避免与氧气发生剧烈反应。

低可燃性：优先选用高燃点、低摩擦敏感性的材料。

耐腐蚀性：在湿氧环境中，需要抵抗电化学腐蚀（如 316L 不锈钢的钝化膜）；在干氧环境中，需要

避免金属氧化生成疏松的氧化物（如铜的氧化亚铜保护层）。而在液氧管道需要考虑真空夹套或者聚氨酯泡沫保温。

清洁度：所有材料需脱脂处理（如 ASTM B280），表面无油脂、颗粒或有机物残留。内壁表面粗糙度 ≤ 0.8 μm，减少摩擦颗粒无积聚。

防静电与接地：避免静电积累引发火花，需导电材料或接地设计。

3.4 管道选材

3.4.1 蒙耐尔合金

蒙耐尔合金，如 Monel K500 在多种腐蚀性环境下如：海水、氯化物、酸性环境以及高温环境中能够抵抗氧化性（可在高温下长期工作，最高使用温度可达 400℃）和腐蚀性。Monel K500 通过热处理，抗拉强度可达到 800MPa 左右，硬度可达到（Hv）400 以上。且其在低温下仍表现出较好的韧性。综上所述，蒙耐尔合金因其出色的耐腐蚀性、高强度、良好的韧性和高温性能，以及优秀的加工和热处理特性，使其成为氧气管道的理想材料选择。一般使用压力在 10MPa 以上及 20MPa 以下且流速不高于 6m/s。

欧洲工业气体协会标准（EIGA. IGC）中提出材料在特定氧气压力、温度及纯度下，历史使用中为发生燃烧事故，且通过标准测试（如机械冲击、摩擦点火试验）证明其安全性的材料称为豁免材料，工程常用豁免材料条件见表 3。

表 3 工程常用豁免材料

工程合金名称	最小壁厚（mm）	豁免压力（MPa）
Inconel 600	3.18	8.61
Inconel 625	3.18	6.90
Inconel X-725	3.18	6.90
Monel 400	0.762	20.68
Monel K-500	0.762	20.68

3.4.2 不锈钢

奥氏体不锈钢对氧气具有极佳的耐腐蚀性，即使 在高温、高压或潮湿环境下，也能保持管道内壁的清洁和平滑，防止因腐蚀引起的泄漏事故。相比之下，蒙耐尔合金虽然也具有良好的耐腐蚀性，但在含氟环境中更为合适。奥氏体不锈钢一般可适用于温度在 200℃ 以下及压力在 15MPa 以下的工况。

以下介绍几种常用的不锈钢钢材：

① 304 不锈钢中铬含量为 18~20%，镍含量为 8~11%。304 不锈钢综合性能好，经济成本低，加工性能好，具有良好的耐腐蚀性。但在高压氧气环境中，抗燃性不足，且在长期高压下，氧化膜可能破裂脱落。

若氧气含水分子或氯离子,易发生点蚀或应力腐蚀开裂。因而 304 不锈钢在中低压、纯氧环境中具有显著的成本和加工优势,但其在高压、高纯度或腐蚀环境中的性能局限需要通过严格设计规范(如控制流速、脱脂工艺)弥补。

② 304L 不锈钢是是低碳版的 304,其中铬含量达 0.030%,镍含量达 8%。其抗晶间腐蚀能力强,在焊接后或消除应力后,能保持良好的耐腐蚀性,适用于对晶间腐蚀敏感性要求高的氧气管道场合;在一般氧气介质中,耐腐蚀性与 304 相当。

③ 316 不锈钢最高使用温度可达到 1200~1300℃,常被用于工况苛刻的条件下。316 不锈钢中钼含量约 2~3%,这使得其耐腐蚀性高于 304 不锈钢,特别是在抗蚀、缝隙腐蚀和氯离子腐蚀方面表现出色,适合用于可能接触到微量腐蚀性介质的氧气管道;耐高温性好,能在较宽温度范围内保持稳定性能,可用于高温氧气输送场合;强度略高于 304。

④ 316L 是 316 的低碳版,抗晶间腐蚀性能优异,焊接后无需进行焊后退火处理,也能有良好的耐腐蚀性,非常适合无法进行焊后热处理的氧气看到工程;耐腐蚀性和耐高温性与 316 相似,在各种氧气介质环境中都有可靠的性能表现。且 316L 不锈钢具有优异的耐氯化物腐蚀的能力。316L 不锈钢碳含量($\leq 0.03\%$)较低,因而能够在 700℃以下展现出良好的耐高温和抗氧化性能,可连续使用,当温度达到 700~1600℃时,可能会出现高温蠕变和高温脆性敏感的情况,故而不可以连续使用。

3.4.3 碳钢

相对于其他金属管材,碳钢管道有较低的成本。碳钢是一种常见且广泛使用的材料,其生产成本相对较低,这使得碳钢管成为经济实惠的选择,尤其适用于大规模的氧气管道系统建设。此外,碳钢还是可回收利用的材料,具有良好的可持续性。使用碳钢管有助于减少资源消耗,并减少对环境的影响。一般可适用于温度在 200℃以下及压力在 3.0MPa 以下的工况。

3.4.4 镍基合金(Inconel 合金)

常用的镍基合金为 Inconel 625/718 两种,以卓越的耐高温高压性能、优异的抗燃性能以及全面的耐腐蚀性能著称,但相较于不锈钢与碳钢材料,其原材料的成本极高,且加工难度大,一般仅用在超高压($\geq 30\text{MPa}$)或液氧状介质的管道中。

一般情况下考虑,在高压/高纯度氧气中选用 Monel、Inconel、316L 不锈钢;在低压情况下,考虑选用脱脂铜合金、304 不锈钢,而在液氧条件下考虑深冷处理后的不锈钢或铝合金。

4 阀门的选材

《深度冷冻法生产氧气及相关气体安全技术规程》GB16912-2008 与《氧气站设计规范》(GB 50030-2013)中明确指出,设计压力大于 0.1MPa 的氧气管道上,不得采用闸阀。这是因为闸阀的密封面在阀门开关过程中会因相对运动而产生摩擦,容易导致擦伤损坏,细小的铁粉会从密封面脱落,这些铁粉在氧气环境中极易着火燃烧。此外,闸阀开关过程中,金属接触面摩擦易产生微小颗粒或火花,在氧气中迅速氧化放热,从而引发爆炸。为了避免此类问题,应严格遵循相关安全规范,选择合适的阀门材质,并定期维护和清理阀门,以确保氧气管道的安全运行。

对于压力 $\geq 1.0\text{MPa}$ 且公称直径 $\geq 150\text{mm}$ 的氧气管道上的手动阀门,宜设旁通阀,以避免快速增压和高速、紊流现象的发生。设计压力 $> 1.0\text{MPa}$,公称直径大于或等于 150mm 的氧气管道上经常操作的阀门,宜采用启动阀门。其中,阀门的密封填料,宜采用聚四氟乙烯(适用于低温氧气)或柔性石墨材料(禁用含硫石墨)。

通入氧气的管道,阀门会有截流作用导致流速增大,因此在一定温度和压力下,阀门后 1.5D 管道考虑使用蒙耐尔合金。氧气管道上的阀门一般选用氧气专用阀,国内多选用截至阀,且介质流动方向应为上进下出,以保证阀杆手里良好且阀芯快速关闭。

5 总结

氧气管道的材质应根据氧气的压力、温度、流速等条件来选用,并且需要满足防腐蚀、防锈、防火的要求。氧气作为强氧化剂,易与还原性物质(如硫化物、金属粉末等)发生剧烈氧化反应,且当系统压力超过 0.3MPa 时,氧化反应速率呈指数级增长,可能引发爆燃事故。在氧气管道设计阶段,严格遵循标准规范,施工阶段强化清洁度控制,运维阶段定期检测和维护,确保氧气管道的长期安全稳定运行。

参考文献:

- [1] 任笑飞. 化工设计过程中管道材料的选用分析[J]. 化工管理,2017,(24):201.
- [2] 朱迎杰,黄涛,邹刘银. 化工装置管道材料的设计及应用研究[J]. 化工管理,2015,(14): 217+219.
- [3] 黄鹂. 浅析化工装置管道材料设计与选用的标准规范[J]. 中国石油和化工标准与质量,2018,36(18):9-10.
- [4] 陈杰,王学磊. 煤气化装置直接作业环节管理“七要素”[J]. 化工管理,2023(33).
- [5] 杨国政,马佳敏,陆遥,李伟,王正强,刘军,刘美丽. 煤气化装置闪蒸罐冲蚀过程的数值模拟[J]. 化工机械,2021(06).