

氧气输送管道及阀门材质选择在实际中的应用

薛锦荣（中科（广东）炼化有限公司，广东 湛江 524000）

摘 要：本文深入探讨了氧气及其与金属材料相互作用的特性，并结合 POX 气化装置的具体工况，详细分析了在氧气输送过程中，如何根据流速限制选择合适的管道及阀门材质。研究旨在确保系统安全的基础上，实现经济性与效率的最优化。

关键词：氧气输送；管道；阀门；材质选择；经济性分析

煤气化是清洁、高效的煤炭深加工的一种方式，是指用煤炭、氧气（富氧、纯氧）、蒸汽等作为原料在高温高压环境下进行气化反应，生产出合成气（主要成分为 CO 和 H₂）的过程。产出的合成气主要应用于大宗化学品、清洁燃料合成、多联产系统、制氢、燃料电池和直接还原炼铁等。煤气化是现代煤化工的基础，在炼油、电力、冶金行业有着广泛的应用，高压氧气作为煤气化过程中的关键原料，其重要性不言而喻，但由于其独特的化学性质，在生产过程中往往是不容忽视的危险源之一。所以要合理选择管道及阀门的材质，做到本质安全，才能杜绝危险事故的发生。本文就 POX 装置氧气阀门及管道材质的选择进行论述。

1 氧气的特性及其在输送过程中的挑战

在进行氧气管道和仪表阀门选择时，理解氧气的物理化学特性非常关键。氧气，无色无味，占空气约

21%，熔点 -218.4℃，沸点 -183℃，难溶于水，液态和固态时呈天蓝色。它助燃且具氧化性，在常温下稳定，但在高温高压下会非常活跃，易与多种元素反应。压缩纯氧是强氧化剂，危险性随压力增加而上升。按 GB6944-2012 标准，归为 5.1 类氧化性物质。油脂与纯氧接触可能引起强烈氧化，因此氧气管道系统必须禁油。碳钢在空气中的熔点为 1500℃，但在纯氧环境中，其着火点会显著降低。例如，碳钢在纯氧中的温度达到 1350℃时，就会发生剧烈的氧化反应，生成氧化铁粉末，即钢铁开始燃烧。表明在纯氧环境中，金属的着火点会大幅度降低，如果氧气管道的材质选择不当，可能会引发极其严重的后果。

2 氧气工况的定义

在氧气管道系统中，气体流动可分为撞击场合和非撞击场合。撞击场合是指流体流动方向突然改变或产生旋涡，导致颗粒物撞击管壁的位置。非撞击场合

表 1 主要金属在氧气环境下的豁免压力

合金名称	最小厚度 (mm)	豁免压力 (MPa)
铜合金	不要求	20.68MPa(3000psig)
铜	不要求	20.68MPa(3000psig)
铜 - 镍合金	不要求	20.68MPa(3000psig)
CF-3/CF-8,CF-3M/CF-8M,CG-8M	3.18mm(0.125in)	1.38MPa(200psig)
CF-3/CF-8,CF-3M/CF-8M,CG-8M	6.35mm(0.250in)	2.6MPa(375psig)
哈氏合金 C-276	3.18mm(0.125in)	8.61MPa(1250psig)
Inconel 600	3.18mm(0.125in)	8.61MPa(1250psig)
Inconel 625	3.18mm(0.125in)	6.90MPa(1000psig)
Inconel X-750	3.18mm(0.125in)	6.90MPa(1000psig)
Monel400	0.762mm(0.030in)	20.68MPa(3000psig)
Monel K-500	0.762mm(0.030in)	20.68MPa(3000psig)
304/304L,316/316L,321,347	3.18mm(0.125in)	1.38MPa(200psig)
304/304L,316/316L,321,347	6.35mm(0.250in)	2.58MPa(375psig)
410	3.18mm(0.125in)	1.72MPa(250psig)
430	3.18mm(0.125in)	1.72MPa(250psig)
17-4pH (age hardened condition)	3.18mm(0.125in)	2.07MPa(300psig)
注：豁免压力适用范围最高为 200℃		

则没有这种流动特性。常见的撞击场合有：对焊三通、承插焊三通、弯头、异径管、阀门（调节阀、安全阀）、过滤器、孔板等。

3 氧气管道材质的选择

在纯氧环境下，金属燃点降低，因此对氧气管道内气体流速有限制，以防摩擦生热引发危险。不过，若金属在特定压力下具备阻燃特性，流速限制可放宽，这便是豁免压力的概念。按《Doc 13/12/E Oxygen Pipeline and Piping Systems》规定，常用金属材料的豁免压力与壁厚总结见表 1。

表 1 给出不同金属的豁免压力及最小壁厚。当氧气压力为 4.8MPa，温度为 25℃ 的环境下，管道材质通常应为 Inconel600、Inconel625、Monel400。在选择 Inconel 合金和 Monel 合金的情况下，POX 装置的氧气压力均在豁免压力内，所以不用考虑氧气流速。这种管道材质的安全优势很大，但是否在经济性上也属于合理的范围，还有待商榷。

由于不锈钢的豁免压力最大为 2.6MPa，它作为氧气管道材质来讲还有诸多限制。根据国家标准《GB 16912-2008 深度冷冻法生产氧气及相关气体安全技术规程》中明确给出氧气环境下，碳钢和不锈钢在撞击场合和非撞击场合的流速及压力对应关系^[2]，见表 2：

表 2 碳钢及奥氏体不锈钢在氧气环境中的允许流速

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	$P \times v \leq 45\text{MPa} \cdot \text{m/s}$ (撞击场合) $P \times v \leq 80\text{MPa} \cdot \text{m/s}$ (非撞击场合)	4.5m/s (撞击场合) 8.0m/s (撞击场合)	4.5m/s

根据表 2 数据，当压力高于 3.0MPa 时，碳钢材质已经不适用于氧气工况。而奥氏体不锈钢在氧气压力小于 3.0MPa、大于 10MPa 时，对管道内氧气有严格的流速限制；当压力在 3.0MPa 与 10.0MPa 之间时，氧气压力和流速的乘积则决定该场合的适用性。在较为严苛的撞击场合下，如选用奥氏体不锈钢作为管道材质，须 $P \times v \leq 45\text{MPa} \cdot \text{m/s}$ 。根据 POX 装置高压氧气的工况，压力 4.8MPa，温度 25℃，氧气管道的尺

寸为 DN150，正常操作流量为 8889Nm³/h，计算出氧气在该管道中的流速 v。根据标况与工况的转换公式得：

$$P_1 \times V_1 \div T_1 = P_2 \times V_2 \div T_2 \quad (1)$$

$$v = V_2 \div S \div 3600 \quad (2)$$

P₁：标况下压力 101.325kPa；V₁：标况下流量，m³/h；T₁：标况下温度 273.15K；P₂：工况下压力 4.8MPa；V₂：工况下流量，m³/h；T₂：工况下温度 298.15K；v：氧气流速，m/s；S：氧气管道截面积 m²

由公式（1）、（2）可知，氧气流速为 v=2.529m/s。由公式得出 $P_2 \times v = 12.1392\text{MPa} \cdot \text{m/s} < 45\text{MPa} \cdot \text{m/s}$ ，可见在这种工况下，管道材质选择奥氏体不锈钢，只要满足表 1 所示厚度，是完全可以的。据此，氧气管道材质为奥氏体不锈钢、Inconel600、Inconel625、Monel400 均可以满足本项目 POX 装置的设计要求，但如何将安全性能和经济效益完美结合，需进一步分析氧气阀门材质的选择，以便确定氧气管道材质。

4 氧气阀门材质的选择

在本项目 POX 装置中，氧气的操作压力高达 4.8MPa，整个氧气管道系统包含 42 台氧气开关阀和 8 台氧气调节阀。为了确保安全生产，与设计院和制造商进行深入的技术交流，确保在满足实际工况需求的同时，选择出既合理又经济的阀门材质方案。在阀门材质的选择上，要考虑几个关键因素：耐高压性能、耐高温性、抗氧化性、经济性。通过与设计院和制造商的紧密合作，可以确保阀门材质的选择满足技术与经济性原则，有助于确保整个氧气管道系统的安全和高效运行，为 POX 装置的安全生产提供坚实的保障。

4.1 阀门的型式

阀门在开关过程中由于截面积发生了变化，氧气流速也会突然改变，若管道内有铁锈的颗粒物存在，在高速流动过程中与管道发生摩擦生热，达到管道着火点之后会发生严重的安全事故。因此在氧气管道上不能使用快开、快关的阀门。由于闸阀在开关过程中可能由于摩擦破损而产生粉末，在氧气大于 0.1MPa 时不允许使用闸阀。阀体的流道内腔还需保证光滑、流畅、无尖角，内部倒角为圆角，尽可能选择流线型，避免氧气在流动过程中无压力突变和流向突变。所以氧气调节阀一般选用柱塞型单座阀，切断阀一般选用球阀。

4.2 阀内件材质

根据 Doc 13/12/E 中第 5.3.2.3 条相关内容，可见

管道内介质会对阀内件及阀后管道产生冲击影响^[3]。因此阀内件的选择应根据表2中描述,以 Inconel 合金和 Monel 合金为主。同时控制流化和含有固体颗粒的流体,一定要对氧阀进行硬化处理,图1中阴影部分为需要硬化处理的工况。

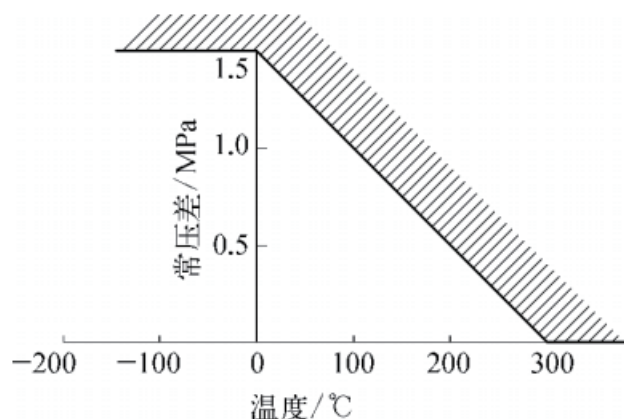


图1 硬化处理对应的温压曲线

4.3 阀门材质选择

根据以上论述,并结合氧气输送系统流程图中相关阀门设置情况。进氧气调节阀之前的管道材质选择,依据氧气压力与流速的乘积 $P_2 \times v = 4.8 \text{ MPa} \times 2.529 \text{ m/s} = 12.1392 \text{ MPa} \cdot \text{m/s} < 45 \text{ MPa} \cdot \text{m/s}$,在这种氧气工况下,不锈钢不存在发生燃烧的可能,因此阀体材质可以选择为不锈钢316L;阀内件材质为 Inconel625 并做硬化处理;阀杆材质为 Inconel718。

在开车阶段,氧气调节阀开度为27%,氧气在阀体内流速为64.09m/s,得出 $P_2 \cdot v_{\text{开车}} = 307.632 \text{ MPa} \cdot \text{m/s} > 45 \text{ MPa} \cdot \text{m/s}$;在正常工况,当氧气调节阀最大开度为80%时,氧气在阀体内流速为12.30m/s,得出 $P_2 \cdot v_{\text{最大}} = 59.04 \text{ MPa} \cdot \text{m/s} > 45 \text{ MPa} \cdot \text{m/s}$,在这两种情况下阀体材质就不能选择奥氏体不锈钢,结合表2不同金属的豁免压力,可以得出,该工况下应选择 Inconel600 作为阀体材质。阀芯阀座材质高于阀体材质为 Monel K500 并做硬化处理,阀杆材质为加强 Monel K500,保证在豁免压力范围内。

选择进气化炉最后一道氧气切断阀材质时,先了解一个概念“绝热压缩”,当氧气管道阀门快速开启时,阀后原来处于低压的氧气受到阀前高压氧气的剧烈压缩,在理论上可能产生接近于绝热压缩的温度,计算公式如下:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} \quad (3)$$

$$t_2 = T_2 - 273 \quad (4)$$

T_1 : 压缩前温度, K; T_2 : 压缩后温度, K; P_1 : 阀后压力, MPa; P_2 : 阀前压力, MPa; K : 绝热指数; t_2 : 阀后温度, °C

由此可见,当阀前后压差越大时,阀后绝热压缩温度就会很高,若阀门材质选择不当就可能达到材料的着火点。结合表1和表2,最后一道切断阀的阀体材质应为 Inconel600,阀芯阀座材质应 Monel500,阀杆材质为 Inconel718。据此,POX装置所有氧气阀门的材质选择均已确定,在保证安全的基础上、性能达到最优。

4.4 氧气管道材质的确定

综上所述,结合氧气输送系统流程分析,氧气调节阀前管道材质选择依据 $P_2 \times v = 12.1392 \text{ MPa} \cdot \text{m/s} < 45 \text{ MPa} \cdot \text{m/s}$ 的结论,选择奥氏体不锈钢材质,可在满足安全的基础上,达到最大的经济性。

氧气调节阀之后的管道选择,主要有两个制约因素:①氧气调节阀后的氧气流速过快,根据表2不锈钢材质已不能满足安全性能的要求;②进气化炉的最后一道氧气切断阀前后,因绝热压缩的概念,管线材质亦不能选择不锈钢。因此,充分考虑安全保障和经济效益,氧气调节阀后的管道材质选择为 Inconel600。

5 结束语

氧气管道和氧气阀门作为煤气化工艺中不可缺少的组成部分,它的选择利用就显得非常重要。一味的考虑安全保障,就会使得项目投资费用大大增加,只有充分结合氧气、各种合金的特性,以及各装置氧气的具体工况,才能更好的对氧气管道材质和阀门材质进行选择,在保证安全的前提下,把经济性提到最优。

参考文献:

- [1] 付荣申.煤化工中氧阀的选型[J].石油化工自动化,2013,49(04).
- [2] GB 16912-2008.深度冷冻法生产氧气及相关气体安全技术规程[S].中国国家质量监督检验检疫总局,2008.
- [3] IGC Doc 13/12/E.Oxygen Pipeline and Piping Systems[Z].

作者简介:

薛锦荣(1990-),男,汉族,甘肃庆阳人,大学本科,工程师,仪控副主任师,研究方向:仪控专业。