

引用格式: 朱军辉. 掺氢条件下的燃气轮机用输气管道设计[J]. 南方能源建设, 2024, 11(4): 164-171. ZHU Junhui. Design of gas turbine fuel gas transmission pipe under the condition of natural gas mixed with hydrogen gas [J]. Southern energy construction, 2024, 11(4): 164-171. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.4.17.

掺氢条件下的燃气轮机用输气管道设计

朱军辉[✉]

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

摘要: [目的] 随着“3060”双碳目标的进展, 利用光伏和风电制取绿氢成为一个热门和前沿的方向。在氢气利用产业中的燃气轮机掺氢燃烧, 则成为将氢转化成电能的最后一个环节。燃气轮机机组设置有调压站、前置模块和连接管道。前置模块对于混合气体的流量、压力、温度和颗粒含量均有要求, 而调压站则为前置模块提供符合要求的混合气体供应, 而中间的连接管道随布置不同, 一般有1 000 m的长度。掺氢连接管道的阻力、温度降低等特性, 对调压站的边界参数有直接影响。因此, 有必要研究掺氢连接管道的阻力、温度降低等特性, 为后续燃气轮机用掺氢管道设计提供工程用可实施解决方案。[方法] 通过GT Pro软件的模拟计算, 给出H燃气轮机在燃用掺氢天然气条件下燃料需求量, 结合H燃气轮机前置模块对燃料的压力和温度的要求, 给出掺氢管道的材质选择和流速选择, 并结合混合气体的物理特性, 计算管道的阻力和由于压力降低引起的温降。[结果] 得出了燃气轮机掺氢燃烧时, 掺氢连接管道的材质选择、管径选择、管道阻力和由于压力降低引起的温降。[结论] 现阶段天然气调压站到燃气轮机前置模块的管道设计, 在考虑具备掺氢条件时, 需逐一评估核实管道材质、外径、壁厚、流速、管道阻力的情况, 让燃气轮机在本阶段燃用天然气, 在将来过渡到掺氢燃烧能顺利实施。

关键词: 燃气轮机; 天然气掺氢; 连接管道; 设计; 输气

中图分类号: TM611; TK91; TE973

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)04-0164-08

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.4.17

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Design of Gas Turbine Fuel Gas Transmission Pipe Under the Condition of Natural Gas Mixed with Hydrogen Gas

ZHU Junhui[✉]

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] With the development of "3060" double carbon target, the usage of the PV and wind power for hydrogen gas production is becoming a hot and cutting-edge direction. The combustion of natural gas mixed with hydrogen gas in gas turbine of hydrogen gas industry will become the final step to convert hydrogen into electric power. The gas turbine unit have pressure regulation station, front module and connection pipe. The front module have requirements on the flow rate, pressure, temperature and particle content. And the pressure regulation station will provide the required mixed gas to front module. The connection pipe will have a length of 1 000 m which depended on the different arrangement. The character of pressure drop and temperature drop of connection pipe will have direct impact on the interface parameter of pressure regulation station. So it is necessary to study the character of pressure drop and temperature drop of connection pipe. And it will provide a practicable solution for the future gas turbine fired with natural gas mixed with hydrogen gas. [Method] The fuel demand was given for the H class gas turbine fired with mixture of natural gas and hydrogen gas after the simulation calculation with GT Pro software. The recommended material selection and velocity selection were presented based on required temperature and pressure drop by H class gas turbine front module and the physical character of mixed gas. The pipe pressure drop and temperature drop due to pressure drop were also calculated. [Result] The pipe material selection, diameter selection, pipe

收稿日期: 2023-04-12 修回日期: 2023-04-23

基金项目: 中国能建广东院科技项目“天然气管道掺氢及掺氢燃烧应用研究”(EV10231W); 中国能建广东院科技项目“天然气掺氢技术研究”(EV06181W)

pressure drop and temperature drop due to pressure drop of pipe are presented. [Conclusion] For present time, the pipe design between natural gas pressure regulation station and gas turbine front module shall evaluate the material, outer diameter, wall thickness, velocity, pipe resistance, etc., each by each under the condition with hydrogen gas mixture. Thus the gas turbine can use natural gas at present phase and can be shifted to combustion with mixed hydrogen gas smoothly.

Key words: gas turbine; natural gas mixed with hydrogen gas; connection pipe; design; gas transmission

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

我国政府提出: 力争 2030 年前实现碳达峰, 2060 年前实现碳中和^[1]。广东省也于 2022 年明确: 到 2030 年, 非化石能源消费比重达到 35%, 非化石能源装机比重达到 54%; 2030 年前实现碳达峰, 达峰后碳排放稳中有降。

目前, 广东省电力系统中 75% 的发电量来自火力发电, 其它由核电、风电、太阳能发电及跨区电力输送(如西电东送等)来提供。根据我国的《氢能产业发展中长期规划(2021~2035年)》, 2030 年实现绿氢的广泛应用^[2]。

文献 [3] 指出, 从多能互补的角度, 我国应大力开展可再生能源与氢能融合发展建设, 实现“两中心、三基地”, 即京津冀氢能应用负荷中心、东部沿海氢能应用负荷中心、东南海上风电制氢基地、西南地区弃水发电制氢基地、三北地区风光氢储综合能源基地的建设布局。绿氢可来源于可再生能源制氢, 利用海上风电这种可再生能源来制氢, 已有了示范项目和依托项目^[4]。文献 [5] 指出, 新型天然气发电与制氢技术路径, 以天然气为能源和资源基础, 通过化学转化获得氢气和电力, 是构建“天然气+氢能”双清洁低碳能源体系重要的技术路径, 并且能够进一步拓展天然气的利用途径, 提高利用效率。说明绿氢的下游用途可用于发电。文献 [6] 指出燃用混氢或者纯氢燃料使新型和现有燃气轮机实现从化石能源向低碳能源过渡, 对于燃气轮机的未来市场前景具有重要意义, 说明燃气轮机可能使用绿氢。

2020 年 12 月, 上海电气燃气轮机有限公司在意大利的实验室开展了 F 级重型燃气轮机燃烧器 20% 掺氢燃烧^[7]。2021 年 12 月, 国家电投集团荆门绿动能源有限公司在运燃气轮机成功实现 15% 掺氢燃烧^[8]。结合我国“3060”双碳目标, 结合制氢产业

的发展和燃气轮机掺氢燃烧技术的发展, 可以预见建设掺氢燃烧的燃气轮机机组将成为一个重要的趋势^[9-10]。

文献 [11-12] 介绍了目前 H 级燃气轮机的主机生产厂家情况, 三菱、通用、西门子和安萨尔多均有相关产品。目前广东省内也有一部分 H 级燃机已投产或建设中。

燃气轮机机组设置有调压站、前置模块和连接管道。前置模块对于混合气体的流量、压力、温度和颗粒含量均有要求, 而调压站则为前置模块提供符合要求的混合气体供应, 而中间的连接管道随布置不同, 一般均有 1 000 m 的长度。掺氢连接管道的阻力、温度降低等特性, 对调压站的边界参数有直接影响。因此, 有必要对掺氢连接管道的阻力、温度降低等特性进行深入研究, 为后续燃气轮机用掺氢管道设计提供工程用可实施解决方案。

1 燃气轮机机型的选取

F 级燃气轮机的主机国内生产厂家有东方电气、上海电气、哈尔滨电气和国际生产厂家三菱、通用、西门子和安萨尔多。目前广东省已投产或建设中的 F 级燃气轮机机组, 9F 级燃气轮机机组占了大部分, 6F 级燃气轮机机组占少数。文献 [10-12] 介绍了目前 H 级燃气轮机的主机生产厂家情况, 三菱、通用、西门子和安萨尔多均有相关产品。目前广东省内也有一部分 H 级燃机已投产或建设中。

考虑到广东省电网现有及未来一段时间内占有主流地位和代表性的机组, 本处选用 H 级燃机作为研究对象。选取三菱 M701J 作为模拟分析用燃气轮机机型。

2 燃气轮机燃料的选取

目前的燃气轮机的燃料, 以天然气为主。也有一些机组采用轻油作为备用燃料。天然气的主要组

成为甲烷(CH_4),一般为 98% 体积含量以上。文献 [13] 介绍了国内首个电解制氢掺入天然气项目在辽宁朝阳落地,在掺氢比为 10% 条件下已实现安全运行 1 a。结合“双碳”的考虑,由于天然气掺氢燃料仍存在一定比例的碳排放,也结合现有天然气掺氢的现状,并考虑一定的提前性,本次选取天然气掺氢 30% 作为研究对象。根据国际能源署(IEA)的报告^[14],其相关特性对比如表 1 所示。

表 1 燃料气体相关特性
Tab. 1 Fuel gas related character

条目	甲烷	氢气	70%甲烷+30%氢气
低位热值/($\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)	50.047	120.067	53.625
高位热值/($\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)	55.533	141.894	59.946
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	0.655 8	0.082 42	0.483 8
密度/($\text{kg}\cdot\text{Nm}^{-3}$)	0.691 8	0.086 94	0.528 1
低位体积热值/($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$)	32.820 8	9.895 9	25.945 0
高位体积热值/($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$)	36.418 5	11.694 9	29.003 0

注:上述热值按温度为 25 °C 计算;密度是按 25 °C, 1.013 bar 的气体状态计算;标准状态是 0 °C, 1.013 bar 的气体状态。

从表 1 可以看出,氢气的低位热值是甲烷的 2.399 倍。按甲烷掺氢 30% 来考虑,混合气体的低位热值比甲烷增加了 7.15%。甲烷的低位体积热值是氢气的 3.317 倍。按甲烷掺氢 30% 来考虑,混合气体的体积低位热值比甲烷减少了 20.95%,是甲烷的 79.05%。

3 前置模块对调压站的要求

燃机前置模块对温度和压力的要求:(1)压力要求在 4.7~5.0 MPa(g) 范围内^[15];(2)温度要求高于烃露点温度,避免气体中有液体析出;(3)固体颗粒应限制在 3×10^{-5} wt(基于燃料重量)以下,所有固体颗粒直径均不能超过 5 μm 。

4 燃料气体消耗量的确定

对于燃气轮机联合循环机组,由于存在夏季工况、性能保证工况、冬季工况和 ISO 工况,本次选取 ISO 工况参数。相关厂址参数如下:大气压力 1.013 bar,环境温度为 15 °C,环境湿度为 60%。空气组分如表 2 所示。

表 2 空气组分

Tab. 2 Air composition

条目	数值
$\text{N}_2/\text{mol}\%$	77.292
$\text{O}_2/\text{mol}\%$	20.738
$\text{CO}_2/\text{mol}\%$	0.030
$\text{H}_2\text{O}/\text{mol}\%$	1.009
$\text{A}_i/\text{mol}\%$	0.931

本文凝汽器冷却选取机力冷却塔二次循环系统,冷却水进水温度选取为 15 °C。燃气轮机配套的余热锅炉,目前以自然循环三压再热无补燃的为主,选取三压再热无补燃的自然循环余热锅炉。相关汽水循环参数如表 3 所示。

表 3 汽水循环参数

Tab. 3 Steam-water cycle parameters

条目	数据
高压主蒸汽压力/MPa(g)	17.015
高压主蒸汽温度/°C	603
中压主蒸汽压力/MPa(g)	4.12
中压主蒸汽温度/°C	612
低压主蒸汽压力/MPa(g)	0.51
低压主蒸汽温度/°C	250

采用美国 Thermal Flow 公司的 GT-Pro 软件对燃气轮机联合循环机组进行模拟,得出相关技术数据如表 4 所示。

在工程设计中,当确定了燃气轮机厂家后,由燃气轮机厂家提供联合循环热平衡图,热平衡图中会给出相关的联合循环数据。根据已有工程将 GT-Pro 软件与燃气轮机厂家提供的热平衡图进行对比分析,在燃用甲烷的情况下,相差不超过 1%。但由于目前还没有投入商业运行的 30% 掺氢和纯氢燃烧的项目,因此,无法进行比对再给出 GT-Pro 模拟的准确度范围,在方案研究阶段可以认为数据可用。

从表 4 可以看出,相同型号的燃气轮机,在燃用混合气体后,与燃用甲烷相比,出力增加了 5.87%,效率提升了 1.36%,碳排放减低 37.7 g/kWh(毛出力)和 11.64%。也可以看出,每度电所耗纯氢体积是甲烷的 3.41 倍,每度所耗混合气体体积是甲烷的

表4 燃气轮机联合循环机组技术数据
Tab. 4 Gas turbine combined cycle technical data

条目	甲烷	氢气	70%甲烷+30%氢气
燃料量/(t·h ⁻¹)	81.51	34.98	76.33
出力/MW	680.204	715.970	684.198
净出力/MW	670.709	690.354	672.919
透平排气温度/℃	1 598.1	1 607.5	1 599.2
燃机排烟温度/℃	634.8	632.4	634.5
效率/%	60.94	62.30	61.09
净效率/%	60.03	61.37	60.17
二氧化碳排放/[g·(kWh) ⁻¹]	323.8	0	286.1
供电气耗/[Nm ³ ·(kWh) ⁻¹]	0.173 2	0.561 9	0.211 3
供电气耗/[kg·(kWh) ⁻¹]	0.119 8	0.048 9	0.111 6
燃料体积流量/(m ³ ·h ⁻¹)	124 291	424 411	157 771

1.27倍。燃气轮机所配置前置模块需要加大尺寸来适应纯氢燃烧。

5 管道设计参数

5.1 掺氢管道材质的选择

文献[16]介绍美国主要采用X52~X80管线钢, ASME B31.12—2014中推荐采用X42、X52钢管。文献[17]介绍了海阳核电一期工程氢气系统室外输气管道采用ASME SA-312GR TP304L的不锈钢材质,也提出管道材质提升至TP316或TP317时,即可有效避免腐蚀。文献[18]介绍了金陵-扬子氢气管道全长超过32 km,设计压力4 MPa,管径为325 mm,钢管材质为20#石油裂化钢管。

从上可以看出,对于长距离氢气输送管道工程,在考虑材料应对氢脆问题的同时,要兼顾其费用,一般不会采用不锈钢材质。鉴于氢气管道和掺氢管道在燃气轮机机组中用量不算太大,其中从调压站到达燃气轮机前置模块一般会超过100 m,但一般不会超过1 000 m,可走埋地或走架空管廊,当管道采用不锈钢材质时,考虑到304、304L和316、316L费用差别不大,综合考虑费用、安全的因素,可以按316L来考虑,埋地时,再作防腐处理;过道路时,另加套管保护。

5.2 天然气管道流速的选择

燃气轮机考虑天然气掺氢气的情况下,由于本阶段氢气的供应没有同步可用,在目前的条件下,一

般燃气轮机项目是按预留掺氢的情况来考虑。因此,天然气管道可按燃气轮机燃用100%天然气和燃用混合气体两者中的大值来选择管径。

国家标准《油气管道运行规范》(GB/T 35068—2018)规定:工艺管气体流速不宜超过15 m/s,不应超过20 m/s;经调压之后压力低于2.5 MPa,出站处流速不应超过25 m/s^[19]。

5.3 掺氢管道流速的选择

由于掺氢管道的流速目前相关标准未有明确的界定,考虑到掺氢后与纯氢相比较,存在的主要问题和危害均是氢脆。在工程实际中,对于掺氢不超过5%的管道,氢脆影响小到可以忽略不计,其材质可按碳钢考虑;因此,本文中掺氢达30%,此时掺氢管道的流速按纯氢管道进行选择。

在《氢气站设计规范》(GB 50177—2005)的第12.0.1部分,给出氢气在不同材料管道和不同压力下的最大流速^[20],如表5所示。

表5 钢管中氢气最大流速

Tab. 5 Maximum velocity of hydrogen gas within pipe

设计压力/MPa	碳钢管最大流速/(m·s ⁻¹)	不锈钢管最大流速/(m·s ⁻¹)
>3.0	10	无规定
0.1~3.0	15	25
<0.1	按允许压力降确定	无规定

在《氢气站设计规范》(征求意见稿)的12.1.2中要求了“氢气管道内的实际流速不应超过工作条件下冲蚀速度的50%”;附录E中,给出了氢气的冲蚀速度的计算公式,如式(1)所示。

$$V_c = \frac{7.8436}{\sqrt{P/ZT}} \quad (1)$$

式中:

V_c ——氢气工作条件下的冲蚀速度(m/s);

P ——氢气管道最低工作压力(MPa(a));

Z ——给定压力、温度条件下氢气的压缩系数,无量纲;

T ——氢气温度(K)。

氢气冲蚀速度的计算如表6所示。

从标准上看出,对于不锈钢管道来说,管道设计压力超出3.0 MPa时,最大流速原则上应有所降低,本文按最大流速20 m/s来考虑,此时,流速也符合小于冲蚀速度的50%的要求。

表 6 氢气冲蚀速度

Tab. 6 Hydrogen gas corrosion velocity

条目	数值
氢气管道最低工作压力/MPa(a)	5.0
氢气温度/K	288
氢气的压缩系数	1.030 305
氢气工作条件下的冲蚀速度/(m·s ⁻¹)	60.4

5.4 掺氢管道管径的选择

管道工作压力按 4.7 MPa(g) 时, 在不同燃料供应比例的情况下管径选择的对比如表 7 所示。

表 7 不同燃料气体供应比例对应的管径选择

Tab. 7 Pipe diameter selection under different fuel gas supply portion

条目	甲烷	氢气	70%甲烷+30%氢气	30%氢气
燃料体积流量/(Nm ³ ·h ⁻¹)	124 286	424 565	—	47 333
混合气体体积流量/(Nm ³ ·h ⁻¹)	—	—	157 769	—
管道设计压力/MPa(g)	>3.0	>3.0	>3.0	>3.0
管道材质	碳钢	不锈钢	不锈钢	不锈钢
管道最大流速/(m·s ⁻¹)	15	20	20	20
最小管道内径/mm	789	1 263	770	422

注: 管径选择按管道实际工作压力来计算。

从表 7 可以看出, 如果混合气体管径按 800 mm 选取, 在完全使用天然气的时候, 由于体积流量减少 (从 157 769 Nm³/h 减少到 124 286 Nm³/h), 是满足最大流速要求的。也就是说, 按混合气体进行管径选择, 是可以同时满足天然气和天然气掺氢管道输送气体的要求。

5.5 天然气管道压降的计算

文献 [21] 介绍按《输气管道工程设计规范》(GB 50251—2015), 给出了介质为天然气时, 管道压降的计算公式, 如式(2)所示。

$$q_v = 11\,522Ed^{2.53} \left(\frac{P_1^2 - P_2^2}{ZTL\Delta^{0.961}} \right)^{0.51} \quad (2)$$

式中:

q_v ——气体($P_0=101.325$ kPa, $T=293$ K)的流量(m³/d);

E ——输气管道的效率系数(取 0.85);

d ——输气管内直径(mm);

P_1, P_2 ——输气管道计算管段起点和终点的压力(绝)(MPa);

Z ——气体的压缩因子;

T ——气体的平均温度(K);

L ——输气管道长度(m);

Δ ——气体的相对密度(kg·m⁻³)。

管道压降的计算如表 8 所示。

表 8 管道压降计算

Tab. 8 Calculation of pipe pressure drop

条目	甲烷
气体($P_0=101.325$ kPa, $T=293$ K)的流量/(m ³ ·d ⁻¹)	3 034 915
输气管道的效率系数E	0.85
输气管内直径d/mm	800
气体的压缩因子Z	1.030 305
气体的平均温度T/K	288
输气管道长度L/m	1 000
气体的相对密度Δ/(kg·m ⁻³)	0.535 0
管道压降/kPa	7.034

5.6 掺氢管道压降的计算

文献 [22] 介绍了雷诺数的计算公式, 如式(3)所示。

$$Re = \frac{dw}{\gamma} = \frac{dw}{\mu\nu} \quad (3)$$

式中:

Re ——雷诺数;

d ——管道内径(m);

w ——流速(m/s);

γ ——运动粘度(m²/s);

μ ——介质动力粘度(Pa(s));

ν ——介质的比容(m³/kg)。

不同燃料气体的雷诺数如表 9 所示。文献 [21] 介绍了水力摩擦阻力系数采用科尔布鲁克 (Colebrook) 公式, 如式(4)所示。

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\lg \left(\frac{k}{3.7d} + \frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda}} \right) \quad (4)$$

式中:

λ ——水力摩擦阻力系数;

k ——管内壁绝对粗糙度(m)。

文献 [22] 介绍了影响摩擦系数的一个重要准数

表9 不同燃料气体供应比例对应的 Re
Tab. 9 Re under different fuel gas supply portion

条目	甲烷	氢气	70%甲烷+30%氢气	30%氢气
管道流速/($m \cdot s^{-1}$)	15	20	20	20
管道内径/m	0.789	1.263	0.770	0.422
运动粘度/($\mu m^2 \cdot s^{-1}$)	79.00	502.62	100.65	502.62
介质比容/($m^3 \cdot kg^{-1}$)	7.17	57.02	9.71	57.02
介质动力粘度/ [$\mu Pa \cdot s$]	11.023	8.814	10.360 3	8.814
Re	151 899	51 729	158 970	17 906

注: (1)管道工作压力按4.7 MPa(g)计算; (2)混合气体的动力粘度按成分百分比加权计算所得。

是雷诺准数 Re 。当 $Re < 2\ 320$ 时, 流体呈层流流动; 当雷诺数 $Re > 4\ 000$ 时, 流体呈紊流流动。流体在紊流粗糙区, 可采用尼古拉兹(Nikuradse)公式, 如式(5)所示。

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{k}{3.7d} \right) = -2 \lg \left(\frac{\varepsilon}{3.7} \right) \quad (5)$$

式中:

ε ——管内壁相对粗糙度。

根据《火力发电厂汽管道设计规范》(DL/T 5054—2016), 管子的 ε (相对粗糙度)可取 0.001 5(冷拔钢管)和 0.045 7(普通钢管或熟铁管)。管子的 ε 为 0.045 7 时, λ 为 0.021 7。

管子的沿程阻力损失按式(6)计算。

$$\Delta p_f = \frac{\lambda \rho \omega^2}{2g} \times \frac{L}{D_i} \quad (6)$$

式中:

Δp_f ——直管的摩擦压力损失(Pa);

ρ ——介质密度(kg/m^3)。

管道的摩擦阻力如表10所示。

表10 管道摩擦阻力
Tab. 10 Pipe friction resistance

条目	甲烷	氢气	70%甲烷+30%氢气	30%氢气
管道内径/m	0.8	1.3	0.8	0.45
管道流速/($m \cdot s^{-1}$)	15	20	20	20
管道长度/m	1 000	1 000	1 000	1 000
直管摩擦压力损失/kPa	3.034	0.417	3.980	1.205

从表10可以看出, 相同管道内径, 1 000 m 长度

的条件下, 混合气体的直管摩擦阻力是 3.980 kPa, 甲烷的直管摩擦阻力是 3.034 kPa。与管道工作压力 4.7 MPa(g) 相比, 占 0.06% 和 0.08%。

5.7 掺氢管道壁厚选择

文献[21]介绍了掺氢管道直管段计算壁厚公式, 如式(7)所示:

$$\delta = \frac{PD}{2\sigma_s \varphi F} \quad (7)$$

式中:

δ ——钢管计算壁厚(mm);

P ——设计压力(MPa);

D ——钢管外径(mm);

σ_s ——钢管的最低屈服强度(MPa);

φ ——焊缝系数;

F ——强度设计系数(一级地区 0.72; 二级地区 0.60; 三级地区 0.40; 四级地区 0.30)。

管道的直管计算壁厚如表11所示。

表11 管道壁厚

Tab. 11 Wall thickness of pipe

条目	甲烷	氢气	70%甲烷+30%氢气	30%氢气
设计压力/MPa	7	7	7	7
管道外径/mm	800	1 300	800	450
管道材质	20	316L	316L	316L
最低屈服强度/MPa	137	177	177	177
强度设计系数	0.72	0.72	0.72	0.72
焊缝系数	1.0	1.0	1.0	1.0
管道计算壁厚/mm	28.39	35.70	21.97	12.36

从表11可以看出, 由于 316L 不锈钢的最低屈服强度高于 20 号钢, 因此, 相同压力和管道外径条件下, 管道计算壁厚 20 号钢比 316L 要厚。

6 结论

通过上述分析, 得出结论如下:

1) 掺氢混合点, 选择在调压站调节阀后, 比选择在前置模块入口管道前, 在安全性上更高, 控制便利性更加优。推荐设置在调压站调节阀后。

2) 掺氢和纯氢气管道的材质, 从调压站到达燃气轮机前置模块一般会超过 1 000 m, 可走埋地或走架空管廊, 当管道采用不锈钢材质时, 综合考虑费用、安全的因素, 推荐采用 316 L。

3) 掺氢和纯氢气管道的最高流速, 在管道采用不锈钢材质时, 当压力高于 3.0 MPa(g) 的情况下, 目前标准并未给出具体数值, 本文推荐采用 20 m/s, 此时, 该流速小于冲蚀流速的 50%。但仍需进一步收集同类工程的实际应用情况和继续开展深入研究。

4) 燃气轮机燃用天然气掺氢的混合气体时, 在选择管道内径时, 需要考虑天然气和氢气的物理特性的不同。在掺氢 30% 的情况下, 当调压站的调节阀后管道采用不锈钢的情况下, 由于不锈钢管道允许最大流速高于碳钢管道, 而且天然气的体积流量少于混合气体的体积流量, 此时按混合气体进行管道内径的选择, 既可满足燃用天然气, 也能满足燃用天然气掺氢 30% 的混合气体。

5) 相同管道内径, 1 000 m 长度的条件下, 管道工作压力按 4.7 MPa(g) 时, 混合气体的直管摩擦阻力是 3.980 kPa, 甲烷的直管摩擦阻力是 3.034 kPa。与管道工作压力 4.7 MPa(g) 相比, 占 0.06% 和 0.08%。所点比例很低, 从工程的角度, 可以不用考虑这个压力降低。

6) 由于 316L 不锈钢的最低屈服强度高于 20 号钢, 因此, 相同压力和管道外径条件下, 管道计算壁厚 20 号钢比 316L 要厚。

现阶段天然气调压站到燃气轮机前置模块的管道设计, 在考虑具备掺氢条件时, 需逐一评估核实管道材质、外径、壁厚、流速、管道阻力的情况, 让燃气轮机在本阶段燃用天然气, 在将来过渡到掺氢燃烧能顺利实施。

参考文献:

- [1] 周沛婕, 潘翔龙, 李娟, 等. 基于“双碳”背景下的电力行业节能减排分析 [J]. *能源与节能*, 2023(1): 63-65. DOI: [10.16643/j.cnki.14-1360/td.2023.01.065](https://doi.org/10.16643/j.cnki.14-1360/td.2023.01.065).
ZHOU P J, PAN X L, LI J, et al. Energy conservation and emission reduction in power industry based on background of "double carbon" [J]. *Energy and energy conservation*, 2023(1): 63-65. DOI: [10.16643/j.cnki.14-1360/td.2023.01.065](https://doi.org/10.16643/j.cnki.14-1360/td.2023.01.065).
- [2] 程明睿, 高宏. 绿氢已成为未来维护能源安全的重要方向 [J]. *科技中国*, 2022(10): 60-65.
CHENG M R, GAO H. Green hydrogen has become the important direction to maintain energy safety in future [J]. *China scitechnology think tank*, 2022(10): 60-65.
- [3] 王杰, 吴昊, 熊力, 等. 内蒙古自治区氢电耦合助力构建新型能源体系实证研究 [J]. *水力发电*, 2023, 49(9): 1-5, 89. DOI: [10.3969/j.issn.0559-9342.2023.09.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.0559-9342.2023.09.001).
WANG J, WU H, XIONG L, et al. Study on new energy system construction assisted by hydrogen-electric coupling in Inner Mongolia autonomous region [J]. *Water power*, 2023, 49(9): 1-5, 89. DOI: [10.3969/j.issn.0559-9342.2023.09.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.0559-9342.2023.09.001).
- [4] 桂薇. 独立式海上风电制氢工艺设计 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(4): 40-46. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.005](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.005).
GUI W. Process design of independent offshore wind power hydrogen production [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(4): 40-46. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.005](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.005).
- [5] 侯建国, 姚辉超, 王秀林, 等. “天然气+氢能”双清洁低碳能源体系构建和技术路径选择 [J]. *天然气化工 (C1 化学与化工)*, 2022, 47(6): 1-5. DOI: [10.3969/j.issn.1001-9219.2022.06.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-9219.2022.06.001).
HOU J G, YAO H C, WANG X L, et al. Construction of "natural gas + hydrogen" dual clean and low-carbon energy system and choice of technical path [J]. *Natural gas chemical industry (C1 Chemistry and Chemical Industry)*, 2022, 47(6): 1-5. DOI: [10.3969/j.issn.1001-9219.2022.06.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-9219.2022.06.001).
- [6] 秦锋, 秦亚迪, 单彤文. 碳中和背景下氢燃料燃气轮机技术现状及发展前景 [J]. *广东电力*, 2021, 34(10): 10-17. DOI: [10.3969/j.issn.1007-290X.2021.010.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-290X.2021.010.002).
QIN F, QIN Y D, SHAN T W. Technology status and development prospects of hydrogen fuel gas turbine under the background of carbon neutral [J]. *Guangdong electric power*, 2021, 34(10): 10-17. DOI: [10.3969/j.issn.1007-290X.2021.010.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-290X.2021.010.002).
- [7] 崔耀欣, 刘晓佩, 陈明敏. F 级重型燃气轮机燃烧器天然气掺氢全压试验研究 [J]. *燃气轮机技术*, 2021, 34(2): 38-42. DOI: [10.16120/j.cnki.issn1009-2889.2021.02.006](https://doi.org/10.16120/j.cnki.issn1009-2889.2021.02.006).
CUI Y X, LIU X P, CHEN M M. Experimental study of natural gas mixed with hydrogen under full pressure of F-class heavy duty gas turbine burner [J]. *Gas turbine technology*, 2021, 34(2): 38-42. DOI: [10.16120/j.cnki.issn1009-2889.2021.02.006](https://doi.org/10.16120/j.cnki.issn1009-2889.2021.02.006).
- [8] 李立新, 张昭昭. 某型号 F 级燃气轮机混氢燃烧的性能分析和工程实践 [J]. *动力工程学报*, 2022, 42(10): 912-918. DOI: [10.19805/j.cnki.jcspe.2022.10.004](https://doi.org/10.19805/j.cnki.jcspe.2022.10.004).
LI L X, ZHANG Z Z. Combustion performance analysis and engineering practice of a F-class gas turbine with hydrogen addition [J]. *Journal of Chinese society of power engineering*, 2022, 42(10): 912-918. DOI: [10.19805/j.cnki.jcspe.2022.10.004](https://doi.org/10.19805/j.cnki.jcspe.2022.10.004).
- [9] 王永江, 韩爽, 闫亚敏, 等. 风光制氢容量配置优化研究及绿氢经济性分析 [J]. *内蒙古电力技术*, 2023, 41(1): 8-14.
WAN Y J, HAN S, YAN Y M, et al. Research on optimization of capacity allocation of wind power and photovoltaic hydrogen production and economic analysis of green hydrogen [J]. *Inner Mongolia electric power*, 2023, 41(1): 8-14.
- [10] 李小龙, 洪小飞, 陈宇卿. 燃气轮机掺氢燃烧技术 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(6): 14-25. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.002](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.002).
LI X L, HONG X F, CHEN Y Q. Hydrogen-blended combustion technology in gas turbine [J]. *Southern energy construction*, 2023,

- 10(6): 14-25. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.002](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.002).
- [11] 王波. 中国内地首台 H 级燃气轮机点火成功 [J]. 能源研究与信息, 2020, 36(2): 87.
WANG B. China first H-class gas turbine was ignited successfully [J]. Energy research and information, 2020, 36(2): 87.
- [12] 王波. 国内首台套安萨尔多 H 级燃气轮机及服务采购合同签订 [J]. 能源研究与信息, 2018, 34(4): 245.
WANG B. China first Ansaldo H-class gas turbine and service procurement contract has been signed [J]. Energy research and information, 2018, 34(4): 245.
- [13] 王晨爽, 林喜振, 许守亮, 等. 9H 级燃机前置模块系统设备布置方案讨论 [J]. 城市燃气, 2021(5): 11-15. DOI: [10.3969/j.issn.1671-5152.2021.05.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-5152.2021.05.004).
WANG C S, LIN X Z, XU S L, et al. The discussion on equipment layout plan of 9H gas turbine [J]. Urban gas, 2021(5): 11-15. DOI: [10.3969/j.issn.1671-5152.2021.05.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-5152.2021.05.004).
- [14] IEA. The future of hydrogen [EB/OL]. (2022-04-28) [2023-03-07]. https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf.
- [15] 任渊源, 光旭, 林俊光, 等. 9H 级联合循环机组增压机无扰切换研究 [J]. 电力勘测设计, 2022(7): 1-5, 24. DOI: [10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2022.07.001](https://doi.org/10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2022.07.001).
REN Y Y, GUANG X, LIN J G, et al. Research on the undisturbed switching of fuel gas boosters in 9H class combined cycle units [J]. Electric power survey & design, 2022(7): 1-5, 24. DOI: [10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2022.07.001](https://doi.org/10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2022.07.001).
- [16] 时浩, 吕杨, 谭更彬. 天然气管道掺氢输送可行性探究 [J]. 天然气与石油, 2022, 40(4): 23-31. DOI: [10.3969/j.issn.1006-5539.2022.04.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-5539.2022.04.003).
SHI H, LÜ Y, TAN G B. Feasibility study on pipeline transportation of hydrogen-blended natural gas [J]. Natural gas and oil, 2022, 40(4): 23-31. DOI: [10.3969/j.issn.1006-5539.2022.04.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-5539.2022.04.003).
- [17] 王妮娜, 夏青扬, 颜士鑫. F 级燃气电厂天然气调压站设计 [J]. 电力勘测设计, 2017(4): 34-37. DOI: [10.13500/j.cnki.11-4908/tk.2017.04.008](https://doi.org/10.13500/j.cnki.11-4908/tk.2017.04.008).
WANG W N, XIA Q Y, YAN S X. Design of gas pressure regulation station for F-class gas turbine power station [J]. Electric power survey & design, 2017(4): 34-37. DOI: [10.13500/j.cnki.11-4908/tk.2017.04.008](https://doi.org/10.13500/j.cnki.11-4908/tk.2017.04.008).
- [18] 谭淳. 南山热电厂天然气调压站设计要点探究 [J]. 产业与科技论坛, 2019, 18(7): 63-64.
TAN C. Study on the main design character of Nanshan thermal power plant natural gas regulation station [J]. Industrial and science tribune, 2019, 18(7): 63-64.
- [19] 窦珍伟, 刘思琦. 燃气-蒸汽联合循环电厂天然气调压站设计 [J]. 常州工学院学报, 2016, 29(4): 20-23. DOI: [10.3969/j.issn.1671-0436.2016.04.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-0436.2016.04.005).
DOU Z W, LIU S Q. Design on natural gas regulating and metering station for a gas-steam combined cycle power plant [J]. Journal of Changzhou Institute of Technology, 2016, 29(4): 20-23. DOI: [10.3969/j.issn.1671-0436.2016.04.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-0436.2016.04.005).
- [20] 张立业, 邓海涛, 孙桂军, 等. 天然气随动掺氢技术研究进展 [J]. 力学与实践, 2022, 44(4): 755-766. DOI: [10.6052/1000-0879-22-056](https://doi.org/10.6052/1000-0879-22-056).
ZHANG L Y, DENG H T, SUN G J, et al. Research progress of natural gas follow-up hydrogen mixing technology [J]. Mechanics in engineering, 2022, 44(4): 755-766. DOI: [10.6052/1000-0879-22-056](https://doi.org/10.6052/1000-0879-22-056).
- [21] 朱珠, 廖绮, 邱睿, 等. 长距离氢气管道运输的技术经济分析 [J]. 石油科学通报, 2023, 8(1): 112-124. DOI: [10.3969/j.issn.2096-1693.2023.01.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.2096-1693.2023.01.008).
ZHU Z, LIAO Q, QIU R, et al. Technical and economic analysis on long-distance hydrogen pipeline transportation [J]. Petroleum science bulletin, 2023, 8(1): 112-124. DOI: [10.3969/j.issn.2096-1693.2023.01.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.2096-1693.2023.01.008).
- [22] 费人杰. 气体管道通用计算方法 [J]. 压缩机技术, 2001(2): 13-15. DOI: [10.16051/j.cnki.yjsjs.2001.02.004](https://doi.org/10.16051/j.cnki.yjsjs.2001.02.004).
FEI R J. The general method for gas piping calculation [J]. Compressor technology, 2001(2): 13-15. DOI: [10.16051/j.cnki.yjsjs.2001.02.004](https://doi.org/10.16051/j.cnki.yjsjs.2001.02.004).

作者简介:



朱军辉

朱军辉(通信作者)

1973-, 男, 正高级工程师, 学士, 主要从事燃煤电厂、燃机电厂和抽水蓄能电站的勘察设计技术管理工作(e-mail) zhujunhui@gedi.com.cn。

(编辑 孙舒)