

掺氢条件下的燃气轮机调压站设计

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“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。氢气利用产业中的燃气轮机掺氢燃烧, 是氢转化成电能的最后一个环节。而调压站介于管网和燃气轮机前置模块之间, 主要功能是将燃气轮机燃料调整到满足燃气轮机所要求的温度和压力。随着燃气轮机采用天然气掺烧氢气作为燃料, 有必要研究调压站在新的边界条件的系统配置, 为后续燃气轮机掺氢燃烧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 F 级燃气轮机在燃用掺氢天然气条件下燃料需求量, 结合 F 级燃气轮机前置模块对燃料的压力和温度的要求, 给出混合器的推荐位置, 混合后管道的材质选择和流速选择, 及相关阀门选型时需关注的问题。[结果] 文章给出了燃气轮机掺氢燃烧时, 调压站的混合器设计位置、管道材质选择、管径选择和阀门选型相关注意事项。[结论] 在使用掺氢天然气作为燃气轮机的燃料时, 受氢气物理特性与天然气中主要成分甲烷的物理特性存在很大差别, 需要在腐蚀、防爆等因素上给予特别考虑, 在调压站系统中的调节阀前设置混合器, 有助于为燃气轮机前置系统提供符合压力和温度要求的燃料, 而混合器后的管道、阀门在尺寸上根据混合气体的物理特性, 选择相应的尺寸及材质。

关键词: 双碳; 燃气轮机; 天然气掺氢; 调压站; 混合器

中图分类号: TK91; TM621

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)03-0135-08

开放科学(资源服务)二维码:



Design of Gas Turbine Pressure Regulation Station Under the Condition of Mixed 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 "carbon peak and neutrality" goals, the application of photovoltaic and wind power for hydrogen gas production is becoming a hot and front direction. In the hydrogen gas industry, the gas turbine fired with mixed hydrogen gas is the final step to transfer hydrogen into electric power. The pressure regulation station, located between the pipeline network and gas turbine front module, is mainly to regulate the gas turbine fuel at the required temperature and pressure. With the use of mixed hydrogen gas as fuel for gas turbine, it is necessary to study the system configuration of pressure regulation station under new condition, which will provide a practicable solution for the future gas turbine fired with mixed hydrogen gas. [Method] The fuel quantity is given for the F class gas turbine fired with mixture of natural gas and hydrogen gas after the simulation calculation with GT Pro software. The recommended position of mixture tank is also given after consideration of the requirements on the temperature and pressure of F class gas turbine front module. And the material selection of pipe and diameter is presented and the relative items to be focused for the selection of valves is also presented. [Result] The recommended position of mixture tank is given under the condition of gas turbine fired with mixed hydrogen gas. And the material selection of pipe and diameter is presented and the relative items to be focused for the selection of valves is also presented. [Conclusion] For the gas turbine fire with mixed hydrogen gas, special attention shall be paid to the anti-corrosion and anti-explosion due to the big difference of physical properties between the methane (which is the main factor of nature gas) and hydrogen gas. The mixture tank arranged before the control valves of pressure regulation station will be

收稿日期: 2023-03-06 修回日期: 2023-03-27

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)

conducive to providing the fuel at the required temperature and pressure for the gas turbine front module. The suitable dimension and material will be selected for the pipe and valves downstream the mixture tank based on the physical properties of mixed gas.

Key words: carbon peak and neutrality; gas turbine; natural gas mixed with hydrogen gas; pressure regulation station; mixture tank

2095-8676 © 2023 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

我国政府已明确提出“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 年印发了《关于完整准确全面贯彻新发展理念 推进碳达峰碳中和工作的实施意见》(下称《实施意见》), 标志着广东“双碳”新征程全面开启, 其中明确了: 到 2030 年, 非化石能源消费比重达到 35% 左右, 非化石能源装机比重达到 54% 左右; 2030 年前实现碳达峰, 达峰后碳排放稳中有降。到 2060 年, 绿色低碳循环的经济体系和清洁低碳安全高效的能源体系全面建成; 非化石能源消费比重达到 80% 以上; 碳中和目标顺利实现。

目前, 广东省电力系统中约 75% 的发电量来自火力发电, 其他由核电、风电、太阳能发电及跨区电力输送(如西电东送等)来提供。

我国的《氢能产业发展中长期规划(2021—2035 年)》规划了氢能发展定位和支撑措施, 同时明确提出了可再生能源制氢即绿氢发展的 3 个阶段性目标, 要求到 2025 年实现绿氢产能 10 万 ~ 20 万 t/a, 2030 年实现绿氢的广泛应用, 2035 年绿氢在终端消费中的比重明显提升^[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。

2022 年 9 月, 文献 [4] 报道了广东省青洲四海上风电项目, 配套建设风电制氢项目, 有望成为全国首个“海上风电+海洋牧场+海水制氢”融合项目。

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。

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。

2020 年 3 月 10 日, 三菱日立电力系统公司表示已经从美国犹他州国有山间电力公司获得了首个燃氢燃料的先进燃气轮机订单。该机组旨在过渡到可再生氢燃料, 从能够燃烧 30% 氢气和 70% 天然气混合燃料过渡到 100% 氢燃料^[7]。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 9F 级重型燃气轮机燃烧器在全温、全压试验条件下, 加入 20% 以内氢含量, 可满足排放、回火及稳定性的要求^[8]。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% 掺氢燃烧改造和运行, 这是我国首次在重型燃气轮机商业机组上实施掺氢燃烧改造试验和科研攻关^[9]。2022 年 9 月 27 日, 国内首台纯氢燃气轮机示范项目(拟建设 1 套 1.7 MW 级纯氢燃气发电机组)获得通辽市能源局核准批复, 标志着我国在纯氢燃气轮机国产化替代方面迈出了重要的一步^[10]。

结合“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。而调压站上游与天然气管网连接, 下游与燃气轮机前置模块连接, 也是掺氢的一个混合点, 因此有必要这阶段针对调压站进行深入的方案研究, 为后续工程建设提供参考。

1 燃气轮机机型的选取

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^[13-14] 和安萨尔多^[15] 多均有相关产品。目前广东省内也有一部分 H 级燃气轮机已投产或建设中。

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, 9F 级燃气轮机机组占了大部分, 6F

级燃气轮机机组占少数。

考虑东方电气在现有 M701F4 机型中达到了 85% 左右国产化率,也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 9F 级燃气轮机机组作为研究对象,燃气轮机机型选取东方电气 M701F5 型号作为模拟分析。

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,一般为 98% 体积含量以上。

文献 [16] 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 (International Energy Agency, IEA) 的报告^[17],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 properties

特性参数	甲烷	氢气	70%甲烷+30%氢气
低位热值/[kJ·(kg) ⁻¹]	50047	120067	53625
高位热值/[kJ·(kg) ⁻¹]	55533	141894	59946
密度/(kg·m ⁻³)	0.6558	0.08242	0.4838
密度/[kg·(Nm ⁻³)]	0.6918	0.08694	0.5281
低位体积热值/(kJ·m ⁻³)	32820.8	9895.9	25945
高位体积热值/(kJ·m ⁻³)	36418.5	11694.9	29003

注:上述热值按温度为 25 ℃ 计算;密度是按 25 ℃, 1.013 bar 的气体状态计算;标准状态是 0 ℃, 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 调压站的边界参数的确定

3.1 前置模块对调压站的要求

文献 [18-19] 介绍了 M701F4 燃机前置模块对温度和压力的要求:(1)压力要求在 2.8 ~ 4.6 MPa(g) 范围内;(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。

3.2 上游管网供天然气参数

天然气管网为了配合向电厂供气,一般在调压站前设置有供气末站,根据广东省的天然气管网的情况,其供气末站出口压力为 4.4 ~ 8.0 MPa(g),温度为常温。

3.3 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:大气压力为 1.013 bar,环境温度为 15 ℃,环境湿度为 60%。

在广东省的燃机,多数机组由于没有靠近海、大河等冷却水源,以采用机力冷却塔的情况居多,也有一部分机组采用海水直流冷却。文章中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 ℃。

9F 级燃机配套的余热锅炉,广东省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。

采用美国 Thermal Flow 公司的 GT-Pro 软件对燃气-蒸汽联合循环机组进行模拟。得出相关技术数据如表 2 所示。

表 2 燃气-蒸汽联合循环机组技术数据
Tab. 2 Technical data of gas-steam combined cycle unit

技术参数	甲烷	氢气	70%甲烷+30%氢气
燃料量/(t·h ⁻¹)	66.57	28.46	62.65
出力/MW	568.390	594.162	577.579
净出力/MW	552.150	565.835	565.312
效率/%	61.41	62.58	61.93
净效率/%	59.66	59.60	60.57
二氧化碳排放/[g·(kWh) ⁻¹]	321.3	0	282.2
供电气耗/[Nm ³ ·(kWh) ⁻¹]	0.1743	0.5785	0.2098
供电气耗/[kg·(kWh) ⁻¹]	0.1206	0.0503	0.1108
燃料体积流量/(m ³ ·h ⁻¹)	101509	345304	129489

从表 2 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 4.62%,效率提升了 0.52%,碳排放降低 39.1 g/kWh(毛出力)和 12.17%。也可以看出,每千瓦时电所耗纯氢体积是甲烷的 3.32 倍,每千瓦时电所耗混合气体体积是甲烷的 1.20 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。

4 调压站的工艺系统设计

4.1 总体工艺流程

调压站由天然气子系统、氢气子系统、混合子系统组成,其中天然气子系统由以下几个功能段组成:进口单元、计量单元、过滤单元、换热单元和调压单元组成;氢气子系统包括了进口单元、计量单元、过滤单元和调压单元^[20]。

进口单元完成燃料气体的打开和关断的功能;计量单元完成燃料气体的流量测量的功能;过滤单元完成燃料气体去除凝结液体和超出可接受标准的固体颗粒的功能;换热单元完成燃料气体的温度调整功能;调压单元完成燃料气体的压力调整功能;混合单元完成燃料气体的混合功能。

4.2 混合单元的选择

文献 [21] 介绍了我国目前仅有掺氢天然气管道输送示范项目“朝阳可再生能源掺氢示范项目第一阶段工程”的掺氢体积比约为 5%。掺混设备采用的电气式随动掺氢结构。天然气作为主气源,氢气作为随动气源。氢气进口压力为 15 MPa(g),掺氢量按照 3%~20% 设计。

掺氢点,可能的位置有 2 个方案。方案一是在调压站中找位置,如前所述,在天然气子系统的换热单元和调压单元后面;方案二是考虑在前置模块中找位置。

前置模块的主要设备包括:燃气热值计、燃气流量计、燃气加热器、燃气过滤器和相关的测量仪器,用于测量燃气热值、燃气流量,加热燃气以达到必需的温度,以及监测燃气供气压力和温度。考虑到前置模块中的工艺参数(压力、温度、流量)是由燃机自带的控制系统直接控制的,如果要掺氢,位置就考虑在前置模块入口管道上。

方案一中,调压站中布置有天然气子系统、氢气子系统、混合子系统,可以考虑由调压站成套厂家统一成套,共同控制。方案二中,氢气子系统和混合子系统要与前置模块布置在一起,由于前置模块需靠近燃气轮机布置,布置在余热锅炉辅助跨,而该区域空间较为狭小,而且特别不要布置氢气放散系统。

方案一和方案二比较,考虑到混合子系统中要求上游的天然气压力控制阀与氢气压力控制阀是按压力信号进行同步控制,布置在一个区域,情况较方案二为优;方案一调压站布置较为独立,可以更好地布置氢气放散系统;方案一调压站布置,也符合危险构筑物相对集中布置,方便安全管理。

因此,推荐氢气子系统和混合子系统布置在调压站。

4.3 掺氢管道材质的选择

文献 [22] 介绍合金材质中的 C、Mn、P、S 等元素会使管材的氢脆敏感性显著上升,且氢损伤现象与钢管强度存在直接联系,氢气管道的选材一般是钢级越低越好。目前欧洲氢气管道材料主要采用 X42、X52、X56 等低强度管线钢,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 [23] 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,总长约 900 m,穿过道路下的管道外设有碳钢套管,套管两端用封板封堵。氢气管道及碳钢套管外表面按特加强级要求做环氧煤沥青涂层。也提出管道材质提升至 TP316 或 TP317 时,即可有效避免腐蚀。

文献 [24] 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;巴陵—长岭氢气提纯及输送管线工程最大管径 457 mm,钢管材质为裂化碳素无缝钢管;济源—洛阳氢气管道实长约为 25 km,管径为 508 mm,设计压力 4 MPa,钢管材质为 L245 无缝钢管,采用常温型三层 PE 外防腐层。

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 500 m,可能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。

4.4 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% 天然气来选择管径。

国家标准《输气管道运行规范》(GB/T 35068—2018)规定:天然气分输场站进站管线至分离器上游阀门间的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^[25]。

4.5 掺氢管道流速的选择

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^[26],如表 3 所示。

表 3 钢管中氢气最大流速

Tab. 3 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%”,如表 4 所示,附录 E 中给出了氢气的冲蚀速度的计算公式。

表 4 氢气冲蚀速度

Tab. 4 Hydrogen gas corrosion velocity

氢气参数	数值
氢气管道最低工作压力/MPa	3.5
氢气温度/K	288
氢气的压缩系数	1.0212
氢气工作条件下的冲蚀速度/(m·s ⁻¹)	71.9

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

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, 绝压);

T —— 氢气温度(K);

Z —— 给定压力、温度条件下氢气的压缩系数。

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,文章按最大流速 20 m/s 来考虑,此时,流速也符合小于冲蚀速度的 50% 的要求。

4.6 掺氢管道管径的选择

管道工作压力按 3.5 MPa 时,在不同燃料供应比例的情况下管径选择的对比如表 5 所示。

表 5 不同燃料气体供应比例对应的管径选择

Tab. 5 Pipe diameter selection under different fuel gas supply portion

管道参数	甲烷	氢气	70%甲烷+ 30%氢气	30%氢气
燃料体积流量/(m ³ ·h ⁻¹)	29002	98658	—	—
混合气体体积流量/(m ³ ·h ⁻¹)	—	—	36996	11099
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	830	1320	810	440

注:管道工作压力按 3.5 MPa 计算燃料气体体积流量。

从表 5 可以看出,如果混合气体管径按 810 mm 选取,在完全使用天然气的时候,由于体积流量减少(从 36996 m³/h 减少到 29002 m³/h),但管道材质已按混合气体选择了不锈钢,此时管道允许最大流速不变,管道流速可以满足最大流速要求的,无需加大管径。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气管道输送气体的要求。

4.7 掺氢管道阀门的选择

每台机组一般设置两条调压管路,一用一备。压力控制单元分支管路流程是由球阀、安全切断阀、工作调压器、监控调压器按照从上游至下游的顺序,串联在一起的安全、监控式调压系统。如果为 2 台机组,则调压管道可二用二备或二用一公共备用。正常工况下,工作调压器调节调压站出口压力,当工作调压器故障,监控调压器自动投入运行;如果监控调压器也发生故障,监控调压器为事故常关配置,该调压支管路关闭。

在《氢气站设计规范》(GB 50177—2005)的第

12.0.3 部分, 给出对氢气管道阀门材料的要求, 如表 6 所示。

表 6 氢气管道阀门材料

Tab. 6 Material of valve on hydrogen gas pipe

设计压力/MPa	材料
<0.1	阀体采用铸钢; 密封面采用合金钢或与阀体一致
0.1 ~ 3.0	阀杆采用碳钢; 阀体采用铸钢; 密封面采用合金或与阀体一致
>2.5	阀体、阀杆、密封面均采用不锈钢

由于掺氢管道压力为 3.5 MPa, 掺氢管道上的阀门, 其阀体、阀杆、密封面均采用不锈钢。

4.8 放散的考虑

调压系统中设置有安全装置, 安全装置应保证在任何情况下都不允许压力超过限定值。系统中设置有运行超压的部分流量压力释放阀和事故时的全容量安全放散用压力释放阀。

调压站中所有的排放阀门所排出的气体都用专用管路引导至安全区域, 并通过放散塔排放。

放散管的材质可考虑采用碳钢管道, 天然气管道和混合气体管道可合用一个放散塔。

5 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不超过 500 m, 可能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, 可以采用 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, 文章推荐采用 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, 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

小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) 由于掺氢管道压力为 3.5 MPa, 掺氢管道上的阀门, 其阀体、阀杆、密封面均采用不锈钢。

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.
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 conservation, 2023(1): 63-65. DOI: 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 an important direction for maintaining energy security in the future [J]. Science and technology in China, 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/OL]. 水力发电: 1-6 (2023-02-22) [2023-03-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1845.TV.20230222.1156.002.html>.
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/OL]. Water power: 1-6 (2023-02-22) [2023-03-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1845.TV.20230222.1156.002.html>.
- [4] 阳西县融媒体中心. 全国首个“海上风电+海洋牧场+海水制氢”融合项目在阳西动工 [EB/OL]. (2022-09-01) [2023-03-02]. www.yangxi.gov.cn/gnlm/tzdblbt/content/post_641110.html.
Yangxi Convergence Media Center. China's first "offshore wind power + marine ranching + seawater hydrogen production" integration project started construction in Yangxi [EB/OL]. (2022-09-01) [2023-03-02]. www.yangxi.gov.cn/gnlm/tzdblbt/content/post_641110.html.
- [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]. 低碳化学与化工, 2022, 47(6): 1-5. DOI: 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]. Low-carbon chemistry and chemical engineering, 2022, 47(6): 1-5. DOI: 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.
- 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.
- [7] 王波. 三菱拿下首个燃100%氢燃料J系列燃气轮机订单 [J]. *能源研究与信息*, 2020, 36(1): 62.
- WANG B. Mitsubishi wins its first order for a J-Series gas turbine that burns 100% hydrogen fuel [J]. *Energy research and information*, 2020, 36(1): 62.
- [8] 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.
- 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.
- [9] 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.
- 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.
- [10] 国家电投集团内蒙古能源有限公司. 国内首台纯氢燃气轮机示范项目落户内蒙古通辽 [EB/OL]. (2022-10-12) [2023-03-02]. <https://news.bjx.com.cn/html/20221012/1260413.shtml>.
- SPIC Nei Mongol Energy Co., Ltd. The first pure hydrogen gas turbine demonstration project in China settled in Tongliao, Inner Mongolia [EB/OL]. (2022-10-12) [2023-03-02]. <https://news.bjx.com.cn/html/20221012/1260413.shtml>.
- [11] 蚁建荣, 何宗泽, 程芳林, 等. H级燃气轮机的发展现状及技术特点分析 [J]. *热能动力工程*, 2022, 37(10): 1-15. DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.10.001.
- YI J R, HE Z Z, CHENG F L, et al. Development status and technical characteristic analysis of H-class gas turbine [J]. *Journal of engineering for thermal energy and power*, 2022, 37(10): 1-15. DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.10.001.
- [12] 赵龙生, 钟史明, 王肖祎. H级重型燃气轮机的最新发展概况 [J]. *燃气轮机技术*, 2017, 30(3): 27-31. DOI: 10.16120/j.cnki.issn1009-2889.2017.03.004.
- ZHAO L S, ZHOHN S M, WANG X Y. Development of the latest H class heavy-duty gas turbine [J]. *Gas turbine technology*, 2017, 30(3): 27-31. DOI: 10.16120/j.cnki.issn1009-2889.2017.03.004.
- [13] 西门子能源. 西门子能源为中国目前最大的燃气-蒸汽联合循环项目提供 H 级燃机 [EB/OL]. (2021-08-26) [2023-03-02]. <https://www.siemens-energy.com/cn/zh/news/magazine-china/power-generation-zengcheng-project.html>.
- Siemens Energy. Siemens Energy supplies H-class turbines for the largest gas-steam combined cycle project in China [EB/OL]. (2021-08-26) [2023-03-02]. <https://www.siemens-energy.com/cn/zh/news/magazine-china/power-generation-zengcheng-project.html>.
- [14] 吉桂明. H级燃气轮机驱动829 MW联合循环装置 [J]. *热能动力工程*, 2016, 31(3): 74.
- GI G M. H-class gas turbine drive 829 MW combined cycle unit [J]. *Journal of engineering for thermal energy and power*, 2016, 31(3): 74.
- [15] 薛天峰. 全球首台GT36-S5型H级重型燃机顺利就位 [EB/OL]. (2022-03-09) [2023-03-02]. http://www.powerchina.cn/art/2022/3/9/art_7444_1330215.html.
- XUE T F. The world's first GT36-S5 H-class heavy-duty gas turbine was successfully put in place [EB/OL]. (2022-03-09) [2023-03-02]. http://www.powerchina.cn/art/2022/3/9/art_7444_1330215.html.
- [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.
- 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.
- [17] International Energy Agency. The future of hydrogen [EB/OL]. (2019-06-14) [2022-04-28]. https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf.
- [18] 王妮娜, 夏青扬, 颜士鑫. F级燃机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.
- 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.
- [19] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5641.2019.07.031.
- TAN C. Exploration of key points of design of natural gas pressure regulating station of Nanshan Thermal Power Plant [J]. *Industrial & science tribune*, 2019, 18(7): 63-64. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5641.2019.07.031.
- [20] 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.
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.
- [21] 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.
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.
- [22] 房子琪, 李蕾, 赵素丽, 等. 氢气管道储运系统经济优化分析 [J]. *山东化工*, 2022, 51(11): 186-187, 190. DOI: 10.19319/j.cnki.issn.1008-021x.2022.11.059.
FANG Z Q, LI L, ZHAO S L, et al. Economic optimization analysis of hydrogen pipeline system [J]. *Shandong chemical industry*, 2022, 51(11): 186-187, 190. DOI: 10.19319/j.cnki.issn.1008-021x.2022.11.059.
- [23] 杨振宇. AP1000核电厂室外氢气输送管道设计研究 [J]. *价值工程*, 2019, 38(7): 99-101. DOI: 10.14018/j.cnki.cn13-1085/n.2019.07.028.
YANG Z Y. Research of outdoor hydrogen transmission pipeline of AP1000 nuclear power plant [J]. *Value engineering*, 2019, 38(7): 99-101. DOI: 10.14018/j.cnki.cn13-1085/n.2019.07.028.
- [24] 蒋庆梅, 王琴, 谢萍, 等. 国内外氢气长输管道发展现状及分析 [J]. *油气田地面工程*, 2019, 38(12): 6-8, 64. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6896.2019.12.002.
JIANG Q M, WANG Q, XIE P, et al. Development status and analysis of long-distance hydrogen pipeline at home and abroad [J]. *Oil-gasfield surface engineering*, 2019, 38(12): 6-8, 64. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6896.2019.12.002.
- [25] 白鑫, 万小芸, 张科. 输气场站高流速工况分析与管控措施研究 [J]. *石油工业技术监督*, 2022, 38(11): 24-27, 52. DOI: 10.20029/j.issn.1004-1346.2022.11.006.
BAI X, WAN X Y, ZHANG K. Analysis and control measures of high flow velocity conditions in gas transmission stations [J]. *Technology supervision in petroleum industry*, 2022, 38(11): 24-27, 52. DOI: 10.20029/j.issn.1004-1346.2022.11.006.
- [26] 戴文松. 炼油企业氢气管道的流速选择兼谈国标 GB 50177—2005《氢气站设计规范》对氢气管道流速的要求 [J]. *标准科学*, 2020(1): 65-69, 86. DOI: 10.3969/j.issn.1674-5698.2020.01.015.
DAI W S. Analysis on the velocity of hydrogen in piping of refineries and the requirement for hydrogen velocity in GB 50177—2005 [J]. *Standard science*, 2020(1): 65-69, 86. DOI: 10.3969/j.issn.1674-5698.2020.01.015.

作者简介:



朱军辉

朱军辉 (通信作者)

1973-, 男, 浙江温岭人, 副总工程师, 正高级工程师, 重庆大学电厂热能动力工程专业学士, 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 叶筠英)