

氢能重载列车加氢站工艺优化研究

刘 玮¹, 王 东², 贾 飞², 田翔宇², 刘梓壮¹, 许 壮^{3*}

(1. 国华能源投资有限公司, 北京 100007; 2. 国华巴彦淖尔(乌拉特中旗)风电有限公司, 内蒙古 巴彦淖尔 015399; 3. 北京低碳清洁能源研究院, 北京 102299)

摘要:针对重载列车的大容量储氢特点,研究了加氢站配置对加注性能的影响。利用动态工艺建模实现了加氢站的高精度仿真,研究了加氢站加注性能影响规律。结果表明,当管束车压力较低时,加氢站加注能力显著下降,通过提升压缩机排量和增加站内储氢量能够提升加氢站加注能力。对比研究了 4 类加氢站配置,结果表明,当采用压缩机排量 500 m³/h、各级储氢水容积 5 m³ 和压缩机排量 1 000 m³/h、各级储氢水容积 3 m³ 的 2 类配置时,加氢站的加注性能接近,可满足储氢量 150、65 kg 的重载列车分别在 50、20 min 内加满。

关键词:氢能重载列车;加氢站;工艺;优化

中图分类号:TK91

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2024)06-0204-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.06.039

Process optimization of hydrogen refueling station for hydrogen-powered heavy-duty trains

LIU Wei¹, WANG Dong², JIA Fei², TIAN Xiang-yu², LIU Zi-zhuang¹, XU Zhuang^{3*}

(1. Guohua Energy Investment Co., Ltd., Beijing 100007, China;

2. Guohua Bayannur (Urad Middle Banner) Wind Power Co., Ltd., Bayannur 015399, China;

3. National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy, CHN Energy, Beijing 102299, China)

Abstract: The large scale application of hydrogen-powered heavy-duty trains will help reduce fossil fuel consumption and reduce carbon dioxide emission. While the on-board hydrogen storage capacity usually exceeds 50 kg, the influence of hydrogen refueling station configuration on refueling performance is studied. The high-precision simulation to hydrogen refueling station is realized by using the dynamic process modeling, and the influence of the refueling performance is studied. Results show that the fueling capacity decreases significantly when the pressure of the tube trailer is low. The fueling performance of hydrogen refueling station can be improved through increasing the compressor capacity and the hydrogen storage bank in the station. Four kinds of hydrogen refueling station configurations are compared and studied. It is shown that the fueling capacity of the hydrogen refueling station with compressor capacity of 500 m³·h⁻¹ and hydrogen storage bank size of 5 m³ is comparable with that of the hydrogen refueling station with compressor capacity of 1 000 m³·h⁻¹ and hydrogen storage bank size of 3 m³, both can fill up the heavy-duty trains with hydrogen storage capacity of 150 kg and 65 kg in 50 minutes and 20 minutes, respectively.

Key words: hydrogen-powered heavy-duty trains; hydrogen refueling station; process; optimization

氢能作为清洁的二次能源在交通、分布式发电及可再生能源并网等方面都有巨大发展前景,被视为 21 世纪最具发展潜力的清洁能源^[1-4]。当前,氢燃料电池汽车已进入市场导入期,国内保有量约 1 万辆,全国建成加氢站超过 270 座。随着地面交通领域氢能应用的推进,轨道交通领域的氢能应用也逐步受到重视,尤其是轨道交通具有大功率、高能量要求,氢燃料电池相比于储能电池具有功率密度大、能量密度高的优势,有利于实现轨道交通电气化、清洁化、低碳化^[5-9]。

早在 2010 年,美国 BNSF 铁路公司在洛杉矶开展了氢燃料电池火车示范,运行了一辆自重 130 t 的燃料电池调车机车,用于减少市郊内燃机车带来的尾气污染和噪声污染。该调车机车动力系统由 2 个

300 kW 的燃料电池电堆与铅酸电池搭配,储氢系统由 14 个 35 MPa 碳纤维氢罐组成,有效用氢量 63.5 kg^[10]。2018 年 9 月,阿尔斯通研发的全球首款氢燃料列车 Coradia iLint 在德国下萨克森州进行试运行,最高时速 140 km/h、一次加氢续航 1 000 km^[11]。同期,日本铁路公司 JR East 与丰田公司合作开发氢燃料电池动车,通过自建加氢站为动车加氢,燃料电池动车时速达到 100 km/h,续航里程 140 km。我国在燃料电池轨道交通领域也进行了示范。2017 年,中车唐山研制出商用型氢燃料电池有轨电车,单次加氢 15 min,可持续行驶 40 km,最高运行时速 70 km/h^[12]。2018 年 6 月,佛山高明也试运行了氢燃料电池有轨电车,采用 200 kW 的燃料电池动力系统,搭配储氢量 20 kg,续

收稿日期:2023-09-01;修回日期:2024-04-13

作者简介:刘玮(1977-),男,博士,高级工程师,研究方向为氢能技术,10000032@ceic.com;许壮(1986-),男,博士,高级工程师,研究方向为氢能技术,通讯联系人,20029052@ceic.com。

驶里程达到 100 km,最高时速 80 km/h^[13]。

地面交通的物流车、大巴车等商务车辆,单次加氢量一般不超过 25 kg,要求加氢时间 15 min 以内,加氢站每日加氢次数 50~100 次,具有“单次加氢量少、单日加氢频繁”的特点。相比之下,氢能重载列车耗氢量大,为了达到合理的续航里程,车载储氢量一般超过 100 kg;另一方面,单日加氢次数一般在 10 次以下,表现出“单次加氢量大、单日加氢次数少”的特点^[14]。本文中基于氢能源调车机车和接触网作业车加注需求,研究加氢站配置和工艺对加注时间和加注能力的影响规律,为氢能重载列车加氢站的设计和 optimization 提供指导。

1 方法

加氢站工艺流程如图 1 所示,由管束车、压缩机、站内储罐系统、加氢机组成,加氢状态下,加氢机通过加氢枪与重载列车的储氢系统受气口相连,形成封闭的流体系统。站内储罐分为低-中-高 3 级,依次取气向重载列车加注,当某一级储氢压力与重载列车中氢气压力差值小于设定压差值时,切换至更高压力的储罐继续对重载列车加注。当站内储罐内氢气压力低于设定的压力限值时,启动压缩机,将管束车中的氢气压缩至站内储罐中,直至储罐达到设定的压力上限后,切换至下一个需要补气的储罐^[15-16]。

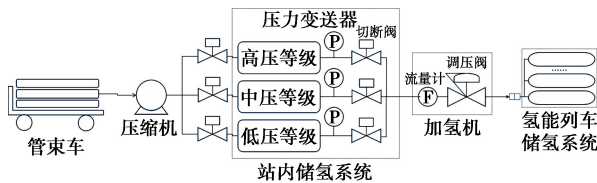


图 1 加氢站工艺流程

对以上流程进行动态工艺建模,建立氢气物性库,进行物质和能量核算。对于管束车、站内储罐以及重载列车的储氢系统,以储氢容器为研究对象,氢气充放过程采用 1 维壁面换热模型进行描述,其中氢气假设为均质^[17]。

储氢容器内氢气质量守恒方程如下:

$$dm/dt = in_1 - in_2 \quad (1)$$

$$\rho = m/V \quad (2)$$

式中, m 为氢气总质量; in_1 和 in_2 分别为流进和流出的氢气质量流量; V 为容器内水容积; ρ 为容器内氢气平均密度。

能量守恒方程如下:

$$dU/dt = in_1 h_1 - in_2 h_2 - \dot{Q} \quad (3)$$

式中, U 为容器内氢气总内能; h_1 和 h_2 分别为进出口氢气滞止焓; \dot{Q} 为单位时间内氢气与容器内壁面的换热量,计算公式如下:

$$\dot{Q} = \alpha_{in}(T - T_{win}) \times A_{in} \quad (4)$$

式中, α_{in} 为内壁面换热系数; T 为容器内氢气平均温度; T_{win} 为容器内壁面平均温度; A_{in} 为容器内表面积。

计算容器内的氢气比内能:

$$u = U/m \quad (5)$$

根据氢气密度和比内能,可通过物性库计算当前状态氢气的压力及温度等热力学参数。

$$P, T, h = f(\rho, u) \quad (6)$$

加氢站内氢气流动过程中由于压缩或者膨胀过程导致氢气温度不断变化,流经储罐、管路阀门等零部件,氢气先与内壁面进行对流换热,然后热量沿着壁厚方向继续热传导,最后通过外壁面与环境之间的对流换热过程将热量移除系统。瞬态热传导方程如下:

$$\partial T_w / \partial t = \{1/[c(r)\rho(r)]\} \cdot (1/r)(\partial/\partial r)[r\lambda(r)(\partial T_w/\partial r)] \quad (7)$$

边界条件为:

$$\dot{Q}_{amb} = \alpha_{out}(T_{wout} - T_{amb}) \quad (8)$$

$$\dot{Q} = \alpha_{in}(T - T_{win}) \quad (9)$$

式中, $c(r)$ 、 $\rho(r)$ 、 $\lambda(r)$ 分别为不同壁面位置材料的热容、密度以及导热系数; \dot{Q}_{amb} 为单位时间内外壁面与环境之间热交换量; α_{out} 为外壁面与环境之间的换热系数; T_{wout} 为外壁面温度; T_{amb} 为环境温度。

当氢气流动处于湍流状态时,氢气与容器或者管壁的内壁面为强制对流换热,采用如下方程实时计算内侧对流换热系数 α_{in} :

$$\alpha_{in} = (Nu \times \lambda)/d \quad (10)$$

$$Nu = a \times Pr^b \times Re^c \quad (11)$$

$$Pr = (c_p \times \eta)/\lambda \quad (12)$$

$$Re = (\rho \times u_{in} \times d_{in})/\eta \quad (13)$$

式中, ρ 、 c_p 、 η 、 λ 分别为氢气当前状态的密度、热容、黏度以及导热系数; u_{in} 为氢气进口状态的平均速率; d_{in} 为进口处当量直径; a 为容器内当量直径或者管壁的内径。外壁面换热系数 α_{out} 取恒定值,取值范围 5~30 W/(K·m²)。

加氢站压缩机类型主要有隔膜式和往复式 2 种,压缩机排量与入口密度、气缸容积效率、压缩比有关,采用如下方程进行压缩机建模:

$$in = V \times P \times \eta \times \rho_{in} \quad (14)$$

式中, in 为压缩机质量流量; V 为压缩机气缸容积; P

为压缩机单位时间内的往复行程数; η 为压缩机容积效率; ρ_{in} 为进气端气体密度。

进气端氢气密度与进口的压力和温度相关:

$$\rho_{in} = \rho_{in}(P_{in}, T_{in}) \quad (15)$$

对于金属隔膜式压缩机, 假定容积效率是固定值, 则排量与入口密度基本呈正比例关系。将压缩机增压过程等效为绝热压缩过程, 功率及能耗简化为下式表达:

$$s(P_{in}, T_{in}) = s(P_{out}, T_{adiab}) \quad (16)$$

$$W_{comp} = (1/\eta_s) \int (h_{adiab} - h_{in}) \times in \times dt \quad (17)$$

$$W_{cool} = \int (h_{adiab} - h_{out}) \times in \times dt \quad (18)$$

$$h_{in} = f(P_{in}, T_{in}) \quad (19)$$

$$h_{adiab} = f(P_{out}, T_{adiab}) \quad (20)$$

$$h_{out} = f(P_{out}, T_{out}) \quad (21)$$

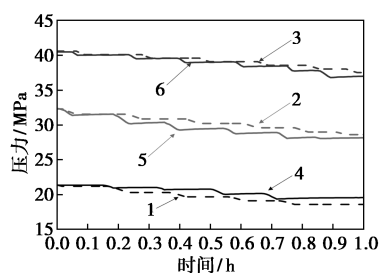
式中, s 为气体熵; P_{in} 、 T_{in} 分别为进气端气体压力和温度; P_{out} 、 T_{out} 分别为排气端气体压力和温度; T_{adiab} 为绝热压缩温度; W_{comp} 、 W_{cool} 分别为压缩机表观压缩功和冷却功耗; η_s 为压缩机压缩效率; h_{in} 、 h_{out} 、 h_{adiab} 分别为进气端、排气端以及绝热压缩的氢气焓值。

对于氢能重载列车加氢站, 供氢管束车水容积 26 m³, 初始压力 20 MPa, 利用至 5 MPa 时更换, 站内储氢的最高压力为 45 MPa, 低压、中压和高压等级储氢的水容积相等, 取值为 2、3、4、5 m³, 压缩机按照入口压力 12.5 MPa 和出口压力 45 MPa 核定排气量, 为 500 m³/h 或 1 000 m³/h。氢能重载列车共计 2 辆, 储氢量分别为 65、150 kg, 加注初始压力 5 MPa, 至 35 MPa 截止, 每天加注 2 次。

2 结果与讨论

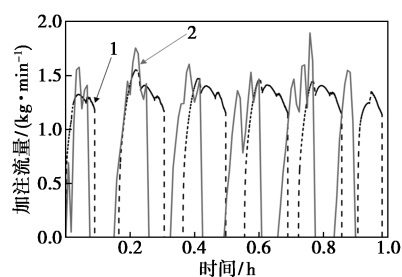
2.1 仿真模型验证

采用商业化运营的某 35 MPa 加氢站数据验证仿真模型的准确性, 选择加氢站高峰作业期某 1 h 的运行工况进行仿真, 针对连续加注时车辆间隔时间的随机性, 仿真过程中假设加注间隔时间相等。如图 2、图 3 所示, 结果表明, 在 6 次加注操作过程中, 仿真获得站内三级储氢的压力变化以及氢气加注过程的流量变化与实际运行结果的变化趋势一致; 随着车辆加注操作的进行, 站内的低压、中压、高压储氢压力逐渐降低, 仿真值与实际运行值偏差约 1 MPa, 每次加注过程的瞬态流量偏差约 10%, 考虑氢气加注过程中存在的调压阀控制偏差和流量计计量偏差, 仿真模型的准确性满足加氢站工艺优化研究要求。



1—储罐 1 仿真压力值; 2—储罐 2 仿真压力值;
3—储罐 3 仿真压力值; 4—储罐 1 运行压力值;
5—储罐 2 运行压力值; 6—储罐 3 运行压力值

图 2 储罐压力仿真结果与加氢站实际运行结果对比



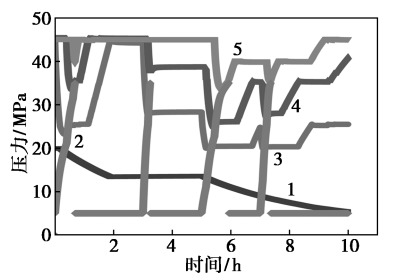
1—仿真结果; 2—实际运行结果

图 3 加注流量仿真结果与加氢站实际运行结果对比

2.2 压缩机配置的影响

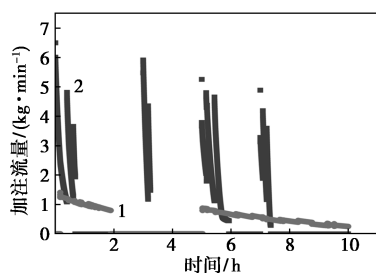
氢能重载列车车载储氢量分别为 65、150 kg, 按照初始压力 5 MPa、每天分别加注 2 次, 总加注能力需求约为 350 kg/d, 因此首先配置排量为 500 m³/h 的压缩机, 研究重载列车加氢站的工艺运行规律。当站内低压、中压和高压储氢水容积均配置为 4 m³, 且设定补气压力限值分别为 25、35、40 MPa 时, 加氢站在全天 10 h 运行过程中的管束车压力、站内储罐压力、车载系统压力以及压缩机流量和加氢机氢气流量曲线如图 4 所示。管束车初始压力 20 MPa, 氢气被压缩机增压输送至站内储罐以维持储罐内氢气压力达到预设的限值以上, 在此过程中, 管束车压力逐渐降低, 在压力值处于 12 MPa 以上时, 压力随时间基本呈线性变化, 当压力在较低范围时, 例如 10 MPa 以下时, 压力下降速率逐渐减缓, 这是由于管束车内氢气压力下降过程中, 氢气密度也随之下降。在第一次加注过程中, 站内储罐的压力逐级下降, 低压储罐首先对重载列车供气, 压力快速降低至约 25 MPa, 然后切换至中压储罐继续加注, 在中压储罐压力降至约 33 MPa 时, 切换至高压储罐, 最终将车载储氢系统充装至 35 MPa, 此时高压储罐压力降至 40 MPa 以下。在接下来的 1 h 中,

压缩机对站内储罐依次补气,高压储罐快速回补至45 MPa,然后切换至中压和低压,分别回补至45 MPa。第二次加注过程中,站内储罐压力依次降低,但由于加注量小,通过低压和中压储罐即完成了加注,高压储罐压力维持在45 MPa,因此没有触发压缩机的补气操作。至第三次加注时,储罐压力进一步降低,压缩机启动,对储罐进行补气,但此时由于管束车压力低,导致压缩机流量小,因而储罐的压力回升速率明显较慢,这使得加注过程的后半程流量下降,加注时间变长。在第四次加注前,储罐的压力只是部分恢复,高压储罐的压力未达到40 MPa,导致第四次加注的流量下降,加注时间也增加。可见,储罐的压力直接决定了加注流量,进而决定了加注时间,而储罐压力的保持,依赖于压缩机流量,由压缩机排气能力和管束车的供气压力决定。当压缩机选型确定时,在管束车压力较低的情况下,加氢站对外的加注能力下降。



1—长管拖车;2—车载储氢瓶;3—低压储罐;
4—中压储罐;5—高压储罐

(a) 运行压力



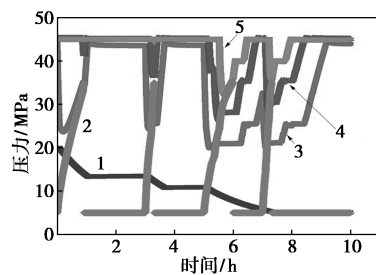
1—压缩机;2—加氢机

(b) 加注流量

图4 加氢站运行仿真结果(压缩机排量 $500\text{ m}^3/\text{h}$,
低压-中压-高压储氢水容积 $4-4-4\text{ m}^3$)

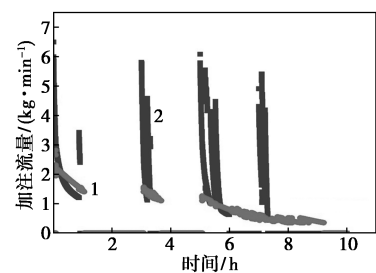
进一步研究压缩机排气能力对加氢站加注能力的影响,将压缩机排量增加1倍,即达到 $1\,000\text{ m}^3/\text{h}$,同时,站内储罐的水容积缩小至50%,即低压、中压和高压储罐的水容积均设定为 2 m^3 。在此配置下,加氢站在一天10 h内的加注性能如图5所示。当管束车压力20 MPa时,压缩机排量达到约

$2\text{ kg}/\text{min}$,而此时的加氢机加注流量约为 $6\text{ kg}/\text{min}$,随着加注的进行,低压储罐压力快速下降,但压缩机启动后对其回补速度也快,因此通过低压和中压储罐供气即完成了第一次加注。在第二次加注前,低压和中压储罐均已达到了充满状态,因此第二次加注时,通过从低压和中压储罐取气基本实现了车载储氢系统快速加满,仅在车载储氢系统压力达到33 MPa以上时采用高压储罐进行了最后充装。但在第三次加注时,管束车压力已降至了约10 MPa,压缩机排量降低至 $1\text{ kg}/\text{min}$ 以下,对储罐的补气速度大幅下降,在储罐压力不足的情况下,加氢机加注速率也随之下降,加注时间显著大于第一次加注。可见,增大压缩机排量在一定程度上提升加注性能,但在管束车压力低的工况下,加氢站的加注能力也面临考验。



1—长管拖车;2—车载储氢瓶;3—低压储罐;
4—中压储罐;5—高压储罐

(a) 运行压力



1—压缩机;2—加氢机

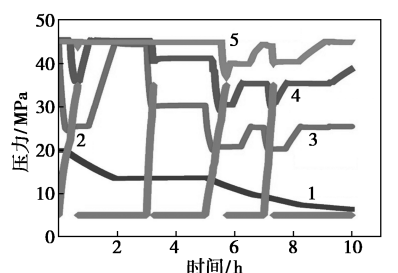
(b) 加注流量

图5 加氢站运行仿真结果(压缩机排量
 $1\,000\text{ m}^3/\text{h}$,低压-中压-高压储氢水容积
 $2-2-2\text{ m}^3$)

2.3 储罐配置的影响

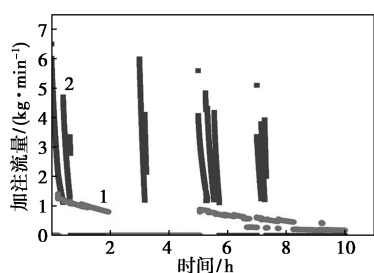
进一步研究储罐配置对加氢站加注能力的影响,分别对配置了 $500、1\,000\text{ m}^3/\text{h}$ 压缩机的加氢站进行储罐容量调整,考虑到经济性影响,分别设置低压、中压和高压储罐的水容积均为 $5、3\text{ m}^3$,储氢总容量比原有配置分别提升了 3 m^3 ,研究配置为压缩机排量 $500\text{ m}^3/\text{h}$ 、各级储氢水容积 5 m^3 和压缩机排

量 1 000 m³/h、各级储氢水容积 3 m³ 的加氢站性能,结果如图 6、图 7 所示。结果表明,当储罐水容



1—长管拖车;2—车载储氢瓶;3—低压储罐;
4—中压储罐;5—高压储罐

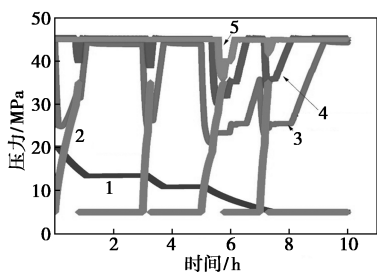
(a) 运行压力



1—压缩机;2—加氢机

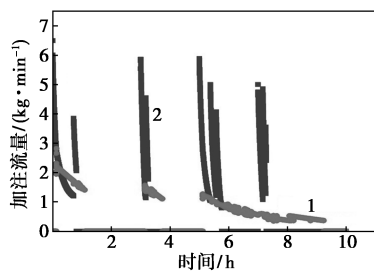
(b) 加注流量

图 6 加氢站运行仿真结果(压缩机排量 500 m³/h, 低压-中压-高压储氢水容积 5-5-5 m³)



1—长管拖车;2—车载储氢瓶;3—低压储罐;
4—中压储罐;5—高压储罐

(a) 运行压力



1—压缩机;2—加氢机

(b) 加注流量

图 7 加氢站运行仿真结果(压缩机排量 1 000 m³/h, 低压-中压-高压储氢水容积 3-3-3 m³)

积增加后,第三次加注的时间均有一定程度缩短,对于储氢量 150 kg 的调车机车,加注时间缩短了约 10 min,对于储氢量为 65 kg 的接触网作业车,加注时间缩短了约 2 min。进一步对比分析以上 4 类压缩机和站内储氢容积的组合,发现压缩机排量 500 m³/h、各级储氢水容积 5 m³ 的配置与压缩机排量 1 000 m³/h、各级储氢水容积 3 m³ 的配置表现出了比较接近的加注性能,综合 2 类储氢量不同的重载列车,配置为压缩机排量 1 000 m³/h、各级储氢水容积 3 m³ 的总加注时间更短。

3 结论

对加氢站进行了动态工艺建模,采用加氢站实际运行数据验证了仿真模型精度,站内储罐压力仿真偏差小于 1 MPa,加氢机加注流量偏差小于 10%。针对储氢量为 150、65 kg 的重载铁路 2 类列车的加注需求,研究了加氢站加注性能影响规律,结果表明,当管束车压力较低时,加氢站加注能力显著下降,通过提升压缩机排量和增加站内储氢量能够提升加氢站加注能力。通过对比 4 类加氢站配置,结果表明,当采用压缩机排量 500 m³/h、各级储氢水容积 5 m³ 和压缩机排量 1 000 m³/h、各级储氢水容积 3 m³ 的 2 类配置时,加氢站的加注性能接近。

参考文献

- [1] Granovskii M, Dincer I, Rosen M A. Greenhouse gas emissions reduction by use of wind and solar energies for hydrogen and electricity production: Economic factors[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32: 927-931.
- [2] Jiao K, Xuan J, Du Q, et al. Designing the next generation of proton-exchange membrane fuel cells[J]. Nature, 2021, 595(7867): 361-369.
- [3] Staffell I, Scamman D, Velazquez Abad A, et al. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system[J]. Energy and Environmental Sciences, 2019, 12(2): 463-491.
- [4] Miller E L, Thompson S T, Randolph K, et al. US Department of energy hydrogen and fuel cell technologies perspectives[J]. Materials Research Bulletin, 2020, 45(1): 57-64.
- [5] Aminudin M A, Kamarudin S K, Lim B H, et al. An overview: Current progress on hydrogen fuel cell vehicles[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48: 4371-4388.
- [6] Manoharan Y, Hosseini S E, Butler B, et al. Hydrogen fuel cell vehicles; current status and future prospect[J]. Applied Sciences, 2019, 9: 2296.
- [7] Singla M K. Hydrogen fuel and fuel cell technology for cleaner future: A review[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28: 15607-15626.

(下转第 212 页)

修,及时更换滤芯或滤布。

(2)进入氢化塔前的氢化液输送管道或氢化液储槽需设置酸滴加系统,并确保酸滴加系统可靠运行。

(3)为防止氧化塔超压爆炸,氧化塔需设置物料紧急泄放装置及压力安全泄放装置。

(4)氧化残液储槽应控制为常压操作,并设置足够的泄压泄爆设施。

3.4 萃取工序

(1)为保证纯水处于酸性条件,纯水加入管线上应设置 pH 在线监测及应急磷酸滴加装置。

(2)为防止过氧化氢随萃余液进入下游碱塔处理装置,生产过程中要严格监控萃余液和萃取液的界面。

3.5 净化工序

重芳烃储罐和管道应采用不锈钢材质,并设置重芳烃蒸馏设施。

3.6 后处理工序

为防止萃余液将空气带入下游工序,需在进入干燥塔前设置萃余液气液分离器。对于平均气温较低或处于室外的后处理工序,设备设施及管道应加强保温措施。

3.7 浓缩工序

为降低高浓度过氧化氢分解可能性,在过氧化氢浓缩时应加入适量的稳定剂。浓缩装置应设置纯水紧急加入系统。浓缩系统应定期排放浓缩残液,避免杂质累积。

3.8 其他管控措施方面

(1)本质安全设计方面。通过增加安全设施(安全阀、爆破片、物料紧急泄放装置)来降低危险部位的风险。合理地设计工艺流程、选型设备设施,避免禁忌物料的相互接触,降低因设备材质导致的风险。要提高自动化控制水平,结合工艺生产合理

地制定自动化控制措施,降低现场人员的数量。

(2)吸取事故经验。针对性地改进现有生产装置存在的风险。近年来,过氧化氢生产事故层出不穷,需要企业认真总结事故经验,不断改进和完善装置的不足之处。

(3)加强专业技术教育和安全培训。专业技术和安全培训是提高装置安全的最有效的措施,企业应选取生产知识和安全知识兼具的技术人员定期对操作员工进行全面系统的培训,确保从业人员能够熟练掌握安全生产技能、安全操作规程及相关法律法规等。同时,未取得过氧化氢生产装置的特种作业操作证的员工坚决不允许上岗。

4 小结

蒽醌法作为国内外生产过氧化氢的主要工艺,虽然技术较为成熟,但仍频繁出现安全生产事故。对比国内外过氧化氢装置事故案例,不难发现过氧化氢的分解才是事故发生最主要的原因。防范过氧化氢生产事故应该从深入了解过氧化氢的分解机理、原辅料及中间产物特性、各类工艺生产特点、设备设施设计、生产过程中的安全操作等方面入手,切实制定好安全防控措施。同时在“自动化减人”方面多做文章,减少现场操作人员、取样分析人员数量,从本质安全角度提升过氧化氢生产装置安全水平。

参考文献

- [1] 张文兵,李晓莉,董武杰.蒽醌法制过氧化氢生产典型事故分析及防范[J].化学推进剂与高分子材料,2002,(2):40-41.
- [2] 姚冬龄.蒽醌法生产过氧化氢安全技术[J].无机盐工业,2007,(5):47.
- [3] 毛义天.蒽醌法生产过氧化氢的安全事故分析及防范措施[J].中国氯碱,2007,(7):36-37.
- [4] 迟志奎,赵晨悦.蒽醌法生产双氧水的安全设施设计[J].山东化工,2018,(17):143.■
- [5] 李俊,李俊,董武杰.蒽醌法生产过氧化氢生产典型事故分析及防范[J].化学推进剂与高分子材料,2002,(2):40-41.
- [6] 姚冬龄.蒽醌法生产过氧化氢安全技术[J].无机盐工业,2007,(5):47.
- [7] 毛义天.蒽醌法生产过氧化氢的安全事故分析及防范措施[J].中国氯碱,2007,(7):36-37.
- [8] 迟志奎,赵晨悦.蒽醌法生产双氧水的安全设施设计[J].山东化工,2018,(17):143.■
- [9] Ajanovic A. Prospects and impediments for hydrogen and fuel cell vehicles in the transport sector [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46: 10049-10058.
- [10] Liu Z, Kendall K, Yan X. China progress on renewable energy vehicles: Fuel cells, hydrogen and battery hybrid vehicles [J]. Energies, 2019, 12(1): 54.
- [11] Hess K S, Miller A R, Erickson T L, et al. Demonstration of a hydrogen fuel-cell locomotive [C]// Rail Conference, 2010.
- [12] Su J Q. Coradia iLint-EMU using hydrogen fuel cell [J]. Modern Urban Transit, 2019, 4: 84-86.
- [13] Du Z, Li A. The world's first hydrogen fuel cell tram is operating in Tangshan [J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(11): 4.
- [14] Chen J B. Discussion on daily maintenance in hydrogen energy tram for Foshan Gaoming Line [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2021, 50(8): 243-247.
- [15] Wang W, Wang R G. Brief introduction of related hydrogen fulling standards of SAE for FCVs [J]. China Standardization, 2023, 632(11): 165-172.
- [16] Gu L L, Wu Y M, Yin L K, et al. Status and prospect of process and configuration technology for hydrogen refueling station [J]. Advances in New and Renewable Energy, 2021, 9(5): 418-425.
- [17] Li F D, Cheng G X, Jia T H, et al. Development status and new mode seeking of hydrogen fueling station [J]. Modern Chemical Industry, 2023, 43(4): 1-8.
- [18] Xu Z, Dong W, Yang K, et al. Development of efficient hydrogen refueling station by process optimization and control [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(56): 23721-23730. ■

(上接第 208 页)