

文章编号: 1008-8857(2023)04-0237-05

DOI: 10.13259/j.cnki.eri.2023.04.006

大型氢冷发电机吸附式氢气提纯方法研究

时 准, 刘 锐

(上海电气电站设备有限公司上海发电厂, 上海 200240)

摘要: 大型氢冷发电机机内氢气纯度与发电机效率直接相关。为解决氢冷汽轮发电机运行过程中机内氢气纯度下降问题, 提出了吸附式氢气提纯方法, 并开发了吸附式氢气提纯装置。通过模拟试验和理论计算对该方法进行了双重验证。试验结果和计算分析均表明, 该氢气提纯方法可以确保氢冷发电机机内氢气纯度(体积分数)稳定在 99% 以上。该方法的推广应用可为大型氢冷发电机组带来可观的经济效益和社会效益。

关键词: 大型氢冷发电机; 吸附式氢气提纯; 氢气系统; 模拟试验

中图分类号: TM31

文献标志码: A

Research on adsorption-based hydrogen purification for large hydrogen-cooled turbogenerators

SHI Zhun, LIU Rui

(Shanghai Generator Works, Shanghai Electric Power Generation Equipment Co., Ltd., Shanghai 200240, China)

Abstract: The purity of hydrogen in a large hydrogen-cooled turbogenerator is directly related to its efficiency. To solve the issue concerning the decrease of hydrogen purity in the hydrogen-cooled turbogenerators during operation, an adsorption-based hydrogen purification method was proposed, and a corresponding device was developed. They were validated through simulation experiments and theoretical calculation. Experimental results and computation analyses indicate that the proposed hydrogen purification method could stably ensure the hydrogen purity at above 99% in the hydrogen-cooled turbogenerators. Its widespread application has considerable economic and social benefits for large hydrogen-cooled turbogenerator units.

Keywords: large hydrogen-cooled turbogenerator; adsorption-based hydrogen purification; hydrogen system; simulated experiment

大型氢冷发电机内氢气纯度是一项重要的运行和监测指标, 与发电机效率直接相关。随着氢

气纯度的降低, 机内混合气体的热容量和导热性能均降低(氢压一定时), 而其密度却显著上

收稿日期: 2023-11-22

第一作者: 时准(1983—), 男, 本科, 高级工程师。研究方向: 大型发电机氢油水系统设计开发。

E-mail: shizhun@shanghai-electric.com

升,这将导致气体温度和发电机本体温度上升,发电机的通风摩擦损耗增加,发电机效率降低^[1]。因此,相关国家标准及行业标准对氢气纯度有明确要求:氢冷电机内氢气纯度(体积分数)不低于95%时,应能在额定条件下发出额定功率,但计算和测定效率时的基准氢气纯度应为98%^[2];发电机内氢气纯度按容积计应在96%以上,且最好运行在氢气纯度98%以上以提高效率^[3]。因此,为使机组能够安全、经济、稳定地运行,严格保证发电机内氢气纯度非常重要。

而实际上,发电机在运行时,受平衡阀自身调节精度、油压波动、密封瓦磨损间隙变大或密封油温度波动等因素的影响,不可避免地会出现空气等杂质气体进入发电机内导致机内氢气纯度下降,进而降低发电机效率的情况。目前,电厂普遍采用排氢、补氢的方法来提高机内氢气纯度,但是这些人工补氢方法增加了安全风险,而且需要持续付出较多的人力和财力。

本文分析了大型氢冷发电机内氢气纯度提升的经济效益和社会效益,提出了一种全新的吸附式氢气提纯方法,并对该提纯方法的有效性进行了模拟试验验证和理论计算分析。

1 氢气纯度提升的经济效益和社会效益

以 QFSN-660-2 型双流环氢冷发电机为例,该发电机损耗与氢气纯度的关系如图 1 所示,发电机效率与氢气纯度的关系如图 2 所示。从图 1 ~ 2 中可见,该发电机内氢气纯度从 95% 提升至 99% 时,发电机损耗从 6 630 kW 降至 6 430 kW,降低了 200 kW 左右,同时发电机效率从 99.004% 提升至 99.034%,提升了 0.030% 左右。

因此,若氢冷发电机内氢气纯度能从 95% 提升至 99%,按机组年均运行 6 000 h 计算,其直接损耗可降低 1.2×10^6 kW·h,相当于每年节约 430 t 标准煤,减少 1 072 t 二氧化碳排放。

可见,在氢冷发电机实际运行时,如果能持续确保其机内氢气纯度,则可以有效提升发电机

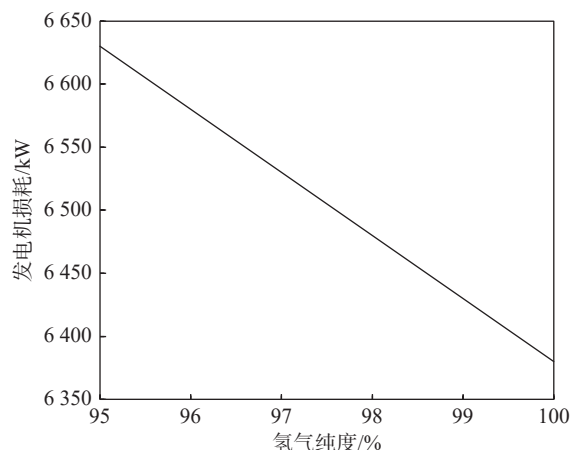


图 1 氢冷发电机损耗与氢气纯度的关系

Fig. 1 Relationship between loss and hydrogen purity in hydrogen-cooled turbogenerator

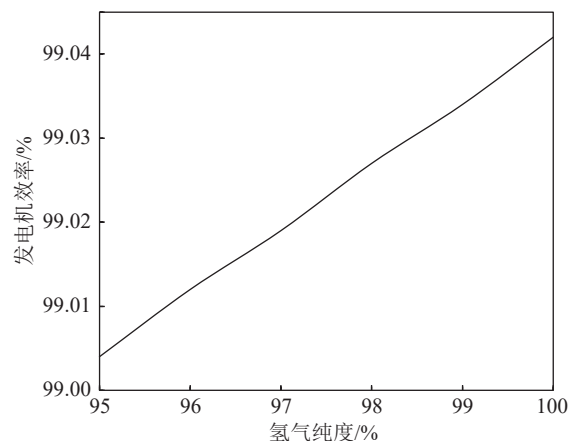


图 2 氢冷发电机效率与氢气纯度的关系

Fig. 2 Relationship between efficiency and hydrogen purity of hydrogen-cooled turbogenerator

效率,从而带来可观的经济效益和社会效益。

2 吸附式氢气提纯方法原理和流程

为了提高实际运行时氢冷发电机内氢气纯度,本文提出了一种全新的吸附式氢气提纯方法,并开发了吸附式氢气提纯装置。该方法的基本原理是,利用专用吸附剂吸附发电机内气体中氧气、氮气、二氧化碳等杂质气体,从而提高氢气纯度。在发电机连续运行时,应用该方法,预期可以将机内氢气纯度长期保持在 99% 以上。

吸附式氢气提纯装置主要技术参数如表 1 所示。

表 1 吸附式氢气提纯装置主要技术参数
Tab.1 Main technical specifications of adsorption-based hydrogen purification device

项 目	参 数	备 注
应用环境	室内、常温	
电负荷	220 VAC, 200 W	
入口气压/MPa	0.3 ~ 0.6	
最大处理量/(Nm ³ ·h)	100	
提纯前氢气纯度/%	90 ~ 98	
提纯后机内氢气纯度/%	≥99	长期运行
防爆等级	Exp IIC	

吸附式氢气提纯装置的主要流程如图 3 所示。该装置由两个吸附塔、管路、阀门及控制系统组成, 其中, 两个吸附塔可相互切换, 以实现一个吸附运行、一个再生, 满足机组运行过程中氢气连续提纯需要。氢冷发电机内氢气从“入口”进入该装置, 经电动角阀 PVA1 流入吸附塔 A 中进行杂质气体吸附提纯处理(阀门 PVB1、PVA2、PV1 关闭), 处理后的高纯度氢气经电动角阀 PVA3(阀门 MV 微开、PVB3 关闭), 从“出口”返回发电机内; 同时, 吸附塔 B 处于再生状态, 将吸附剂中杂质气体排至排空管路。当吸附塔 A 内吸附剂饱和时, 将其切换为再生状态, 同时将吸附塔 B 切换为吸附状态, 如此

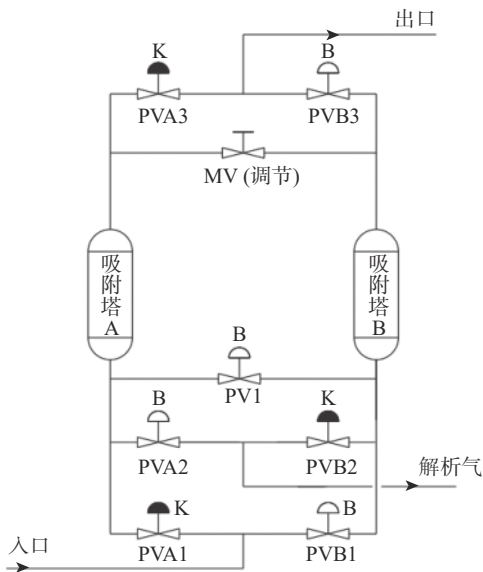


图 3 吸附式氢气提纯装置流程图

Fig.3 Operation flow of adsorption-based hydrogen purification device

双塔交替循环运行, 实现机组运行过程中氢冷发电机内氢气连续提纯。

3 吸附式氢气提纯方法的试验验证

为了验证该吸附式氢气提纯装置的有效性和实用性, 对其进行了模拟试验。

3.1 模拟试验系统流程

模拟试验系统根据氢冷发电机实际运行配置进行设计, 其流程如图 4 所示。从模拟发电机(体积约 2 m³)引出的气体依次流经氢气循环风机、氢气干燥器和吸附式氢气提纯装置, 最后回到模拟发电机。其中, 纯度检测仪用于检测从模拟发电机引出的气体中氢气纯度, 也即模拟发电机内氢气纯度。

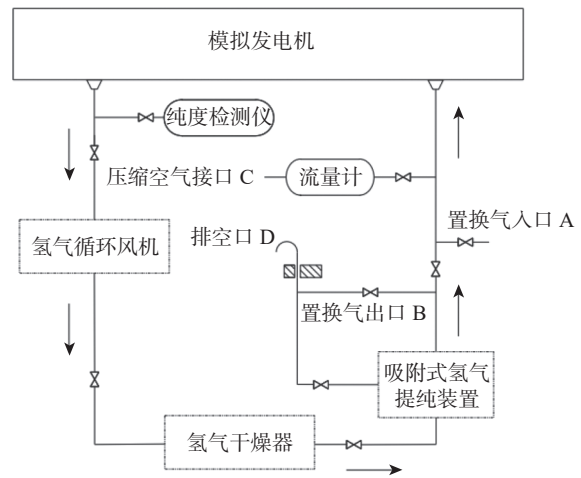


图 4 模拟试验流程图

Fig.4 Flow chart of simulated experiment

3.2 模拟试验过程

吸附式氢气提纯模拟试验步骤为:

(1)静态检查: 所有设备气密试验、电气试验均合格, 外观无异常; 将所有设备按图 4 正确连接后, 再按相关要求气密试验;

(2)气体置换: 模拟发电机真实气体置换流程, 先用 CO₂ 置换系统内空气, 再用 H₂ 置换系统内 CO₂, 直至机内氢气纯度达到 95%, 然后持续充气将氢压提升至 0.5 MPa;

(3)系统调试: 将氢气循环风机、氢气干燥器和吸附式氢气提纯装置等的参数设定在正常工作值;

(4)模拟发电机运行工况：为模拟发电机空气渗入较多的工况，通过压缩空气接口 C 送入空气(流量取 $0.04 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)，然后投运吸附式氢气提纯装置，检测并记录模拟发电机内氢气纯度的变化，5 min 记录一次。

(5)氢气提纯模拟试验 2 h 后，释放模拟发电机内氢气，使其压力降至 20 kPa 左右，然后用 CO_2 置换系统内氢气，再用空气置换 CO_2 ，完成模拟试验。

3.3 模拟试验结果

在吸附式氢气提纯装置的处理能力为 $20 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ，氢气提纯装置出口氢气纯度为 99.99% 时，根据模拟试验结果，得到模拟发电机内氢气纯度随时间的变化如图 5 所示。

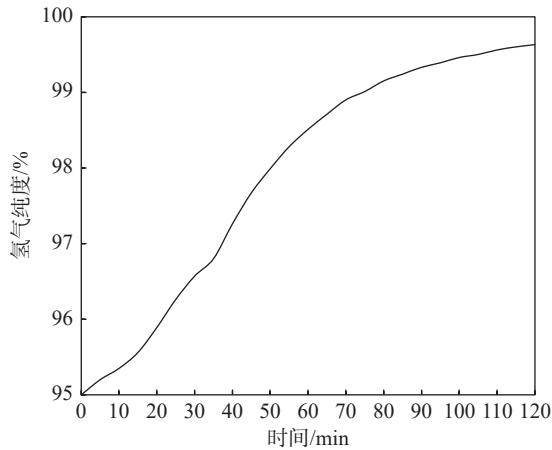


图 5 氢气纯度模拟实验结果随时间的变化

Fig. 5 Changes of hydrogen purity with time in the simulated experiments

由图中可见，采用该吸附式氢气提纯方法，可在 2 h 内将模拟发电机内氢气纯度从 95% 提升到 99.6%，因此可以认为，即使在发电机内渗入较多空气的情况下，该方法也有足够的能力将机内氢气纯度提升至 99% 以上。

4 氢冷发电机机内氢气提纯效果的计算分析

发电机内氢气纯度提升过程是一个边提纯、边恶化的逐步迭代提升过程。某一时刻 t_n 发电机内氢气纯度 a_n 是前一时刻 t_{n-1} ($t_{n-1}=t_n-\Delta t$, Δt 为时间间隔) 发电机内氢气纯度 a_{n-1} 、氢气提纯

装置出口气体对发电机内氢气纯度的提升 q_1 、杂质气体对发电机内氢气纯度的降低 q_2 及日常补氢所含杂质气体对发电机内氢气纯度的降低 q_3 的代数和，即

$$a_n = a_{n-1} + q_1 - q_2 - q_3 \quad (1)$$

在 Δt 内提纯装置出口气体对发电机内氢气纯度的提升 q_1 为

$$q_1 = \frac{Q(P - a_{n-1})\Delta t}{V} \quad (2)$$

式中： Q 为氢气提纯装置处理能力， $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ； P 为氢气提纯装置出口氢气纯度，%； V 为在标准状态下发电机机内气体总量， Nm^3 。

在 Δt 内从外部进入发电机的杂质气体对发电机内氢气纯度的降低 q_2 为

$$q_2 = \frac{x\Delta t}{V} \quad (3)$$

式中， x 为杂质气体进入发电机内的平均流量， $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。

在 Δt 内发电机日常补氢所含杂质气体对发电机内氢气纯度的降低 q_3 为

$$q_3 = \frac{N(1 - a_0)\Delta t}{V} \quad (4)$$

式中： N 为发电机氢源补氢流量， $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ； a_0 为发电机氢源补氢纯度，%。

将式 (2) ~ (4) 代入式 (1)，可得某一时刻 t_n 发电机内氢气纯度 a_n 为

$$a_n = a_{n-1} + \frac{Q(P - a_{n-1})\Delta t}{V} - \frac{x\Delta t}{V} - \frac{N(1 - a_0)\Delta t}{V} \quad (5)$$

式中： $n \geq 2$ ，且为正整数；当 $n=2$ 时， a_1 为初始状态的机内氢气纯度。

应用上述方法对上述模拟试验工况进行计算，可得到模拟发电机内氢气纯度随时间的变化，如图 6 所示。

比较图 5、6 可见，计算结果与模拟试验结果的整体变化趋势一致，而且将模拟发电机内氢气纯度由 95% 提升至 99.6% 所需的时间相同，因此，应用上述计算方法可以预测本文开发的吸附式氢气纯度提纯技术的提纯效果。

对于实际运行的大型氢冷发电机，机内氢压

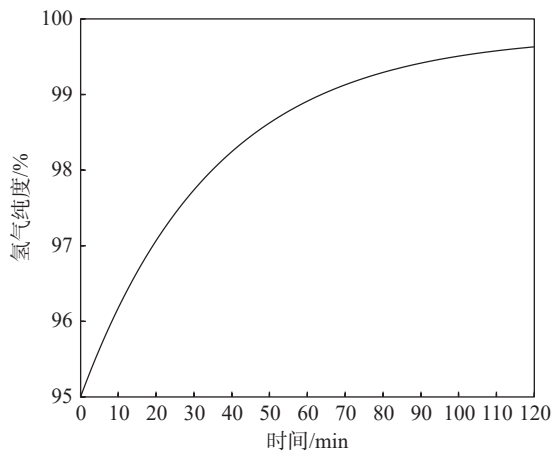


图6 氢气纯度计算结果随时间的变化

Fig. 6 Changes of hydrogen in the simulated experiments purity with time

为 0.5 MPa, 运行允许的氢气最低纯度为 92%、氢气纯度最大下降速度为 $0.3\% \cdot d^{-1}$ 、最大补氢量为 $0.75 \text{ Nm}^3 \cdot h^{-1}$, 发电机氢源补氢纯度为 99%。考虑到最恶劣工况下氢气提纯能力, 假设发电机运行过程中氢气纯度最大下降速度为运行允许的氢气纯度最大下降速度的 1.5 倍, 即氢气纯度下降 $0.45\% \cdot d^{-1}$, 则对于 QFSN-660-2 型双流环氢冷发电机, 其杂质气体进入发电机的平均流量约为 $0.1 \text{ Nm}^3 \cdot h^{-1}$ 。如果氢气提纯装置的最大处理能力为 $100 \text{ Nm}^3 \cdot h^{-1}$, 提纯后返回机内的氢气纯度为 99.9%, 则应用式 (5) 可得机内氢气纯度随时间的变化如图 7 所示。

由图中可以看出, 即使在比较恶劣的条件下, 也可以在 20 h 后将发电机机内氢气纯度由 92% 提升至 99.5% 以上。

目前, 该吸附式氢气提纯方法已在有关电厂投入实际应用, 并取得了预期效果。

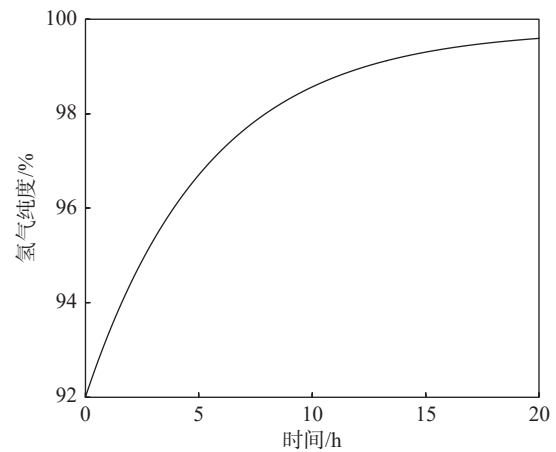


图7 氢冷发电机机内氢气纯度随时间的变化

Fig. 7 Changes of hydrogen purity in hydrogen-cooled generator with time

5 结论

为解决大型氢冷发电机运行过程中机内氢气纯度下降问题, 提出了吸附式氢气纯度提纯方法, 并开发了吸附式氢气提纯装置。模拟试验及计算分析结果表明, 试验结果与计算结果一致, 该吸附式氢气提纯装置可以满足电厂大型氢冷发电机实际运行过程中机内氢气连续提纯需要。

参考文献:

- [1] 汪耕, 李希明. 大型汽轮发电机设计、制造与运行 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2012.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 隐极同步发电机技术要求: GB/T 7064—2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [3] 国家能源局. 汽轮发电机运行导则: DL/T 1164—2012 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [22] 中国国家认证认可监督管理委员会. 组织温室气体排放核查通用规范: RB/T 211—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [23] 刘丰, 王维国. 人口年龄结构变动对碳排放的影响-基于生育率和预期寿命的跨国面板数据 [J]. 资源科学, 2021, 43(10): 2105 - 2118.
- [24] 方芳. 新型城镇化视角下我国居民消费习惯实证分析 [J]. 商业经济研究, 2020, 805(18): 60 - 62.

(上接第 221 页)

- [20] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 温室气体排放核算与报告要求: GB/T 32151—2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 基于项目的温室气体减排量评估技术规范 通用要求: GB/T 33760—2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.