

中国电极锅炉现状及展望

王昊¹, 董鹤鸣¹, 杜谦¹, 魏国华²

(1. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨锅炉厂有限责任公司 & 低碳热力发电技术与装备国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150046)

摘要:“30·60”双碳目标下,中国未来40年能源革命是构建新型能源消费体系的重要阶段,涉及各个领域能源结构的优化、调整与转型。电极锅炉与适和的储热系统联用可实现大面积热水、蒸汽供给,是应用潜力巨大的电热转换设备。本文首先介绍了“双碳目标”下电极锅炉的应用与发展现状,就其在工业和生活领域的应用前景进行了相关分析,分析了行业内普遍存在的问题,并指出了当前国内急需攻克的技术难关。结论如下:未来电极锅炉在可再生能源发电消纳、电网调峰、清洁供暖与农村电气化等方面应用前景广阔;我国电极锅炉行业已可以实现自主生产制造,但仍然面临着诸多难题,这些问题主要集中在水质、电极材料、腐蚀与析氢4个方面。针对上述问题提出了电极制造、H₂检测、抑制与处理和安全防护系统等技术攻关建议。

关键词:电极锅炉;核电厂;调峰储能;清洁供暖;析氢

中图分类号:TK02 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.08.001

[引用本文格式]王昊,董鹤鸣,杜谦,等.中国电极锅炉现状及展望[J].热能动力工程,2023,38(8):1-12. WANG Hao, DONG He-ming, DU Qian, et al. Current situation and outlook of electrode boilers in China[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(8): 1-12.

Current Situation and Outlook of Electrode Boilers in China

WANG Hao¹, DONG He-ming¹, DU Qian¹, WEI Guo-hua²

(1. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001;

2. Harbin Boiler Company Limited & State Key Laboratory of Low Carbon Thermal Power Generation Technology and Equipment, Harbin, China, Post Code: 150046)

Abstract: Under the "30 · 60" double-carbon target, China's energy revolution in the next 40 years will be an important stage of building a new energy consumption system, involving the optimization, adjustment and transformation of energy structure in various fields. The combination of electrode boiler and suitable heat storage system can supply hot water and steam in a large area, which is an electrothermal conversion equipment with great application potential. Firstly, this paper introduces the application and development status of electrode boiler under the "double-carbon target", then discusses its application prospect in industry and life, then analyzes the common problems in the industry, and points out the technical difficulties that need to be overcome urgently in China. The conclusions are as follows: in the future, electrode boiler will have a bright future in renewable energy power generation consumption, peak regulation of power grid, clean heating and rural electrification; China's electrode boiler industry has

收稿日期:2022-08-09; 修订日期:2022-09-15

基金项目:黑龙江省自然科学基金研究团队项目(TD2022E002);哈尔滨工业大学-中国广核集团先进核能与新能源研究院自主研发项目(CGN-HIT202212)

Fund-supported Project: Research Team Program of Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (TD2022E002); Central Government-affiliated Colleges and Universities Basic Scientific Research Business Expenditure Supported Project (CGN-HIT202212)

作者简介:王昊(1999-),男,哈尔滨工业大学硕士研究生.

通讯作者:董鹤鸣(1990-),男,哈尔滨工业大学助理研究员.

been able to manufacture independently, but many difficulties remain which mainly focus on four aspects: water quality, electrode materials, corrosion and hydrogen evolution. For the above problems, some technical suggestions are put forward, such as electrode manufacturing, H_2 detection, suppression and treatment, safety protection system, etc.

Key words: electrode boiler, nuclear power plant, peak shaving energy storage, clean heating, hydrogen evolution

引 言

随着能源清洁转型的不断深入,风、光等清洁能源将逐渐取代煤炭等化石能源^[1],成为可利用的主要能源。国家能源局发布的《关于 2021 年风电、光伏发电开发建设有关事项的通知(征求意见稿)》提出,2030 年我国一次能源消费将有 25% 左右来自可再生能源,风电和太阳能发电总装机量达 12 亿千瓦以上^[2-4]等目标任务。

风能和太阳能由于存在不稳定性和随机性,与电力系统的平稳性和可靠性相矛盾^[1,4],随着其在能源供给中比例的不断提高,造成整个能源系统中储能总量不断减少,具体表现为调节能力不足。而储能技术作为一种有效的技术手段,能够将随机波动能源变为友好能源^[1,5],有效减缓新能源发电的随机性和波动性,保障电网的安全运行。

近年,随着储能技术的快速发展,与清洁能源配套的蓄热储能技术相应地有所完善。其中,电极锅炉蓄热技术是应用前景十分广阔的高效储能技术^[1,6]。电极锅炉蓄热储能技术是指利用低谷电力加热水,以显热或者潜热的形式将热能在蓄热罐储存起来,在用电高峰期间将存储的热量释放出来以满足大面积供暖或外供工业蒸汽等其他用热的需要,均具有能量转换效率高、无环境污染、调节控制便利等优点。电极锅炉蓄热完全可以适用于发电厂端,能够大幅度提高机组灵活调节能力,其分布式储热的灵活电加热方式可以完全实现低谷储热,提高电网低谷调峰能力^[7-8]。

2022 年 7 月 13 日,工信部网站公示了《全国工业领域电力需求侧管理第四批参考产品(技术)目录》,其中就包括电极式锅炉蓄热系统,国内更加重视电极锅炉蓄热系统在储能、调峰、消纳新能源等方面的作用,致力于推动能源结构的快速转型,解决储能领域的难题,使得清洁能源得到快速的发展。本

文介绍了电极锅炉的相关应用,重点介绍了电极锅炉水储热技术在当前及未来的应用前景。

1 电极锅炉的原理

1.1 基本类型

电极锅炉的工作方式与传统的电锅炉有着很大的区别,传统的电锅炉的加热方式为电阻式加热,即通过电热管来加热炉水^[9],而电极锅炉则是通过将高压的电极直接作用于具有一定阻值的炉水,从而产生热水或蒸汽,实现电热之间高效的转化,其效率可达 99% 以上。

电极锅炉由于基本结构和工作原理的不同,可分为喷射式和浸没式两种类型,如图 1、图 2 所示。

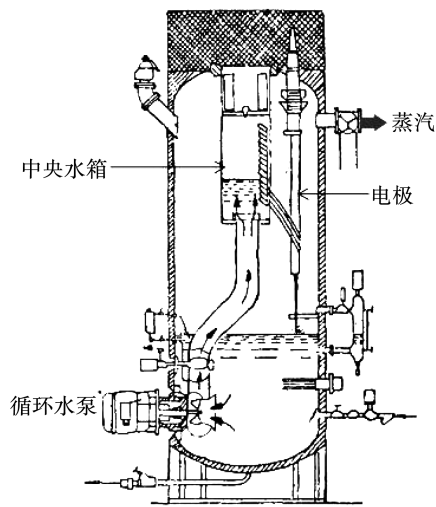


图 1 喷射式电极锅炉^[10]

Fig. 1 Jet electrode boiler^[10]

喷射式电极锅炉:主体结构是一个大型的压力容器,在容器上部装有一个储水容器,储水容器周围垂直地安装着电极^[10]。容器底部储有处理过的炉水,炉水通过循环水泵输送到储水容器之中,并通过容器壁四周的喷嘴喷出至周围的高压电极上,沿电极向下流动^[10],高压电流使得水加热蒸发,产生蒸汽。

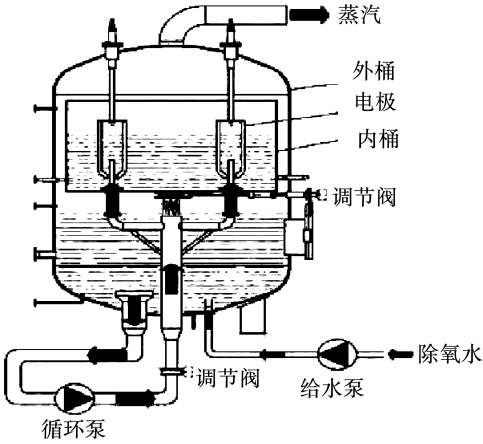


图 2 ZETA 浸没式电极锅炉^[11]

Fig.2 ZETA submerged electrode boiler^[11]

浸没式电极锅炉:主要分为内、外筒两个区域,位于炉外的循环水泵向锅炉外筒输送经过处理的除氧水,炉内的循环水泵将外筒中的水输送至内筒,内筒的炉水在高压电极的作用下变成热水或蒸汽。通过调控外筒补水控制高压电极的浸没深度,从而调节锅炉的输出功率。

两种电极锅炉之间有着很大的不同之处,将其进行比较分析,如表 1 所示。由表 1 可以看出,浸没式电极锅炉对于循环水量的要求较少,对三相电极进线电电源无要求,蒸汽品质较高,运行维护简单,设备要求较低且占地面积小,便于分布式安装,与喷射式电极锅炉相比具有突出的优势,便于大规模应用。

表 1 两种类型电极锅炉的比较

Tab.1 Comparison of two types of electrode boilers

项目	喷射式电极锅炉	浸没式电极锅炉
原理	炉水直接喷射到炉内电极上进行加热,电极并非直接浸没于炉水中,而且电极与锅炉的金属筒体并不直接接触,故不需要对金属筒体进行绝缘处理	将连接着高压电源的电极浸没于炉水之中进行加热,而且由于电极通过炉水与金属筒体之间有间接的接触,故需要对金属筒体进行绝缘处理
电源要求	三相四线中心点接地	炉内的三相电极基本处于对称状态,因此对进线电源线没有特殊要求
蒸汽品质	含盐量较高	含盐量较低
循环水量	主要靠喷射的水量来维持其加热功率,因此水量很大	循环水量较小,主要是用来补充蒸发损失
绝缘要求	外壳带电,需要设置绝缘装置	外壳不带电,不需要绝缘处理
炉水的导电率	较高,约为 1 700 μs/cm	较低,约为 20 ~ 65 μs/cm
运行维护	较为复杂,需要定期地排污以及补水,而且对水质的要求较高	较为简单
占地面积	较大	较小

由于 1995 年瑞士核电站启动锅炉发生爆燃事故,喷射式电极锅炉被欧洲禁用,仅在北美等地区使用,国内目前的产品也以浸没式居多,故本文只针对浸没式电极锅炉做具体的分析。

1.2 运行机理

浸没式电极锅炉的主体结构如图 3 所示。主要由内筒区、外筒区及蒸汽区 3 部分组成。其中,内筒的主要功能是实现对炉水的加热从而产生热水或蒸汽,外筒用来存储水以及补充内筒耗水,蒸汽区则是通过对出口蒸汽的调节来调整内筒的压力^[9]。

锅炉启动时通过位于内筒的三相高压电极将电压施加于内桶的炉水,使得炉水在较短的时间内实现快速升温。内筒与外筒之间通过循环水泵和管道连接,当内筒水由于满足使用条件而发生转移时,外筒内部的溶液通过循环水泵源源不断地输送至内筒以补充耗水,外筒的水则是通过外侧的给水泵来进行补充。

由于内桶水的电导率会随蒸汽的不断输出和盐分的不断积累发生变化,故需设置参数检测装置以及加药调整装置进行及时调整,一般加药装置设置在外

筒与给水泵相连的管道上。对于筒内液体电导率较高的情形,则通过内筒排污阀排出部分高浓度的炉水。

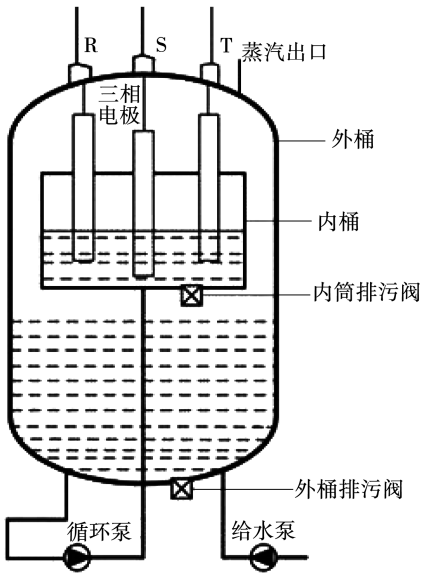


图 3 电极锅炉结构原理图^[9]
Fig.3 Structural diagram of electrode boiler^[9]

内桶上方设置有蒸汽出口阀,用于及时调整内桶压力。当锅炉需要停止运行时,需要先把蒸汽阀门开到最大降压,并逐步减少循环泵供水,降低内桶水位和输出功率^[9],等输出功率降到足够低时高压侧电源分闸,关闭循环泵和供水泵,停止锅炉。

2 行业现状

2.1 发展历程

对于电极锅炉的研究至今已有 100 余年的历史。1905 年欧洲发明了世界上第一台电极锅炉,当时,受限于工业水平,并未得到广泛应用;20 世纪 20 年代,ZETA 公司对电极锅炉进行了改造,成功发明出 ZETA 牌高压电极锅炉,提高了安全性能;20 世纪 40 年代,欧洲发明了另一种电极锅炉——喷射式电极锅炉,降低了对绝缘性能的要求,此时电极锅炉开始应用于工业生产领域;20 世纪 70 年代至 80 年代,国外的核电站建设规模迅速增大,此时由于电极锅炉高环保性和安全性,广泛应用于核电建设之中^[10];20 世纪 90 年代,国内首次引进了西屋公司核电技术,喷射式

电极锅炉开始在中国大规模应用。

2.2 合作现状

第 1 台电极锅炉问世至今已有 100 余年,漫长的发展历程中许多海外电极锅炉制造商不断积累经验和进行技术革新,形成了各具特色的产业品牌,由此占据了电极锅炉市场的大部分份额。由于国内对于电极锅炉的研究起步较晚,技术水平不够成熟,难以自主研发制造电极锅炉,因此多数的国内企业都是通过与国外厂商技术合作等方式来谋求自身的发展。

表 2 介绍了部分海外重点的电极锅炉制造商及其国内的合作厂商。

表 2 国内外企业合作现状
Tab.2 Present situation of cooperation between domestic and foreign enterprises

国外公司名称	国家	国内典型合作方
Parat Halvorsen AS (帕拉特)	挪威	平高电气
ZANDER & INGESTRÖM AB(Z&I)	瑞典	北京瑞特爱
P2H	瑞典	双良锅炉
Elpanneteknik(阿帕尼)	瑞典	宝馨科技
ACME(埃科美)	加拿大	上能锅炉
INOPOWER(一诺)	丹麦	北京动力港
Vapor Power International	美国	泰山集团
Cleaver-Brooks(CB)	美国	青岛圣火
PRECISION(精工)公司	美国	上海克劳利
Caloritech(克劳利热能)	加拿大	青岛达能
VAPEC AG	瑞士	天津宝成机械

由表 2 可以看出,目前大部分的国内企业都是采用与海外厂家联合,引进先进技术设备等方式来开展高压电极锅炉的研发、生产与制造。但实际上,从当前市场上各种类电极锅炉的份额比例来看,进口品牌更易得到用户的认可,多数国内用户在选择高压电极锅炉特别是当前国内难以独立生产的大功率高压电极锅炉时都更加倾向于进口产品,即便是那些进军国内市场相对较晚的国外品牌,依然能够借助品牌效应迅速打开国内市场。

图 4 分析了近年来国内部分企业的技术路线以及发展历程。国内对于电极锅炉的大规模引入始于

本世纪初,随着人们更深刻地认识到化石能源所引起的环境污染的危害以及国内面临着能源结构的转型等问题,国内厂商开始研究电极锅炉在能源转型中所发挥的作用。受限于技术因素,初期的厂商合作多以技术引进为主,分析原因为:一方面,电极锅炉作为高尖端技术产品,其生产制造存在着诸多技术困难,需要部分技术交叉集成,研发的难度较大^[11]。国内对于电极锅炉技术的研究起步较晚,部分技术达不到需求,并且测试大功率电极锅炉的实验条件难以获得,

给国内厂商研发、生产、制造电极锅炉带来了很大的困难。另一方面,在大规模技术引进之前,国内已采购和使用的电极锅炉均为海外品牌,并且已经形成产业链,部分厂商不得不通过寻求国际合作的方式来开拓国内市场。

基于以上原因,从本世纪初国内的部分企业开始谋求与海外厂商合作,通过引进尖端技术以及不断学习改进来开拓国内市场和进行技术积累。

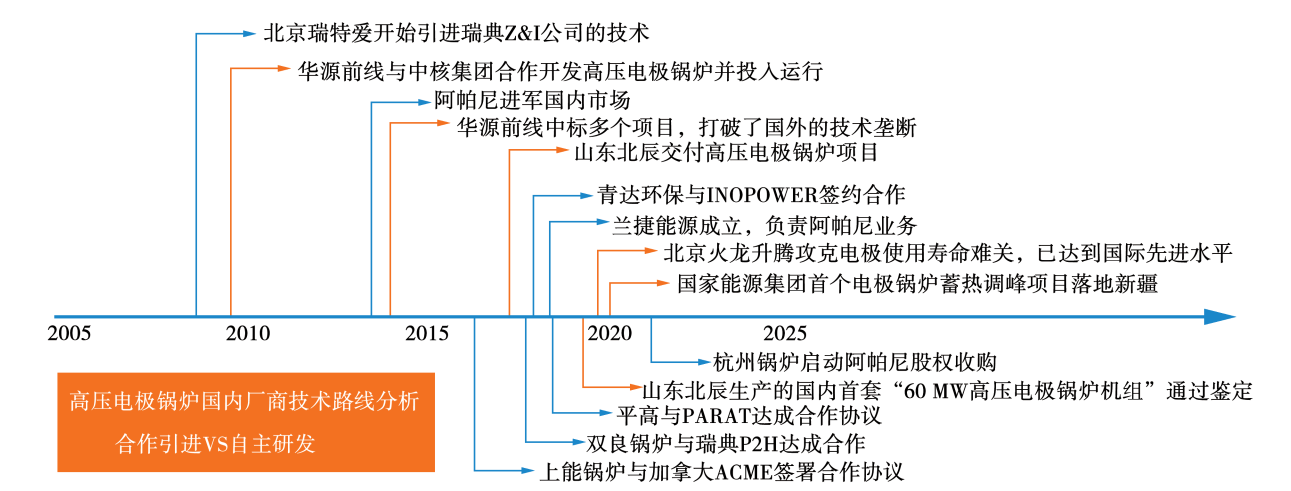


图 4 国内厂商技术路线分析

Fig. 4 Technical route analysis of domestic manufacturers

2.3 技术创新

合作引进并不意味着完全照搬,当前与国外厂商建立良好合作关系的国内企业都是结合了国内的实际需求来进行技术改进。国内较为出名的浙江上能锅炉有限公司便是选择与加拿大 ACME 进行合作,上能没有延续 ACME 在国外的产品型号,而是结合国内实际开发出了一种新型的全浸没式结构电极锅炉 (CEJS),成为国内唯一一家能够把全浸没式电极式结构技术同时应用到高电压电极热水和蒸汽锅炉的厂家。

当然,国内部分厂商并没有选择与国外企业进行技术合作,而是选择了更加艰难的自主研发。杭州华源前线能源设备有限公司和山东北辰机电设备股份有限公司便是具有突出代表性的两家国内企业。在生产实践中不断实现技术突破革新,已经形成了自己

的技术路线并不断突破自我,成为名副其实的国产领军企业。

虽然国内对于电极锅炉的研发较晚,在实际应用过程中仍然会遇到各种技术难题,但经过科研人员的不畏艰难,刻苦攻关,使得国内电极锅炉行业快速发展。表 3 整理了近年来国内部分企业在电极锅炉的生产研发过程中的技术发展情况。可以看出,无论是选择与国外厂商合作还是选择自主研发的国内企业都进行了专项技术攻关并取得了一定的成果,已经逐步形成产业体系。例如,华源前线专注于蓄能供热系统,拥有专利 80 余项,其产品在民用供暖、工业供热方面均得到了广泛地应用。山东北辰的主要产品高压电极锅炉蓄热/供热机组为自主研发产品,已被认定为国内技术领先水平。

表 3 国内部分企业的技术研发现状

Tab. 3 Present situation of technology research and development in some domestic enterprises

公司名称	技术成果
浙江上能锅炉有限公司	解决了部分电极锅炉由于水乱流导致三相电极与零电极之间电阻不一致的问题,提出了循环泵联动内布水器的新型结构
北京瑞特爱能源科技股份有限公司	提出了一种热水、蒸汽两用的电极锅炉系统,减少了用户热能转换形态的繁琐性
北京火龙龙腾工贸有限公司	申请了一种长寿命电极锅炉电极棒的专利,大大提高了其使用寿命,已达到国际先进水平
江苏双良锅炉有限公司	研发了一种更稳定、安全的连接高压电极锅炉的用液位计的绝缘结构
杭州华源前线能源设备有限公司	开发了一种非水液体介质的高压电极加热装置,提供了新型的蓄能方式
山东北辰机电设备股份有限公司	解决了传统的低压电极锅炉受限于结构的加热水量较大和流动性较差、零筒的固定可靠性不好等缺点,在每个电极上均套设了零筒

核心技术研发是企业赖以生存和进步的基础,在国内企业对高压电极锅炉蓄热产品的不断研发过程中,关键核心技术的积累使得国内企业能够保持较高的竞争力^[11-12],拓展出更多的增量市场。

随着储能产业的发展和技术的不断进步,国内对于电极锅炉蓄热系统的研究已经步入了新的阶段,各企业也在不断拓展蓄热产品路线,表 4 为国内部分企业的蓄热产品路线。

表 4 国内部分企业的蓄热相关产品线

Tab. 4 Some enterprises' heat storage related product lines

公司名称	蓄热相关的主要产品
青岛达能环保设备股份有限公司	高压电极锅炉 + 水蓄热罐
山东北辰机电设备股份有限公司	高压电极锅炉 + 水蓄热罐/ 固体蓄热锅炉
江苏双良锅炉有限公司	高压电极锅炉 + 固体蓄热锅炉
杭州华源前线能源设备有限公司	高压电极锅炉 + 水蓄热罐
北京瑞特爱能源科技股份有限公司	高压电极锅炉 + 水蓄能设备

在已经商业化的电极锅炉储能蓄热技术中,“电极锅炉 + 水蓄热罐”无疑是近年来最热门的蓄热技术。相当一部分的企业已经不局限于水体蓄热,而是进行组合式发展,开发出固体蓄热、熔盐换热等技术路线。

综合来看,国内企业对于电极锅炉的关键技术领域进行了相关的技术突破,在高压电极锅炉的应用尤其是对蓄热调峰改造进行了相关的探索,并且已成功应用于项目之中,实现了技术路线的突破,有助于电极锅炉的大规模推广应用。

3 应用现状与前景

3.1 当前应用现状

在碳中和目标大背景下,电极锅炉蓄热系统作为能够实现清洁能源消纳领域的核心技术,已得到深入推广,其安全、环保、操作简便的特点使得它在核电厂辅助蒸汽系统、蓄热供暖及火电厂灵活性改造等方面得到了广泛应用。

电极锅炉作为电厂辅助蒸汽系统的重要组成部分,在机组启停阶段电极锅炉辅助蒸汽系统进行减压处理,满足用户侧的需求^[13]。目前,国内除部分老型核电站外基本采用电锅炉,国际上在建、新建的核电站均采用电极锅炉作为启动锅炉使用^[11,13]。

碳中和背景下国家大力推进清洁供暖工程,加快国内能源体系的改革,在这种情况下电极锅炉蓄热系统在供暖领域得到了更为广泛的应用^[12]。其中,电极锅炉水蓄热供暖系统以高转换效率和普适性在全国范围内已经成功试点运行并投入工程应用,在新疆、青海等地已完成电极锅炉水蓄热系统的大规模推广应用。

高压电极锅炉 + 水蓄热罐方案是当前火电厂调峰改造的主要方式之一,它能够合理利用谷电实现能量转化,缓解电力系统的供应紧张的形式,进一步提升电力资源的使用效率。同时,其经济效益较为显著。

3.2 未来应用前景

在国家能源局 2021 年发布的《关于加快推动新型储能发展的指导意见》中指出,储热技术已经被列入新型储能技术范畴^[5]。电极锅炉蓄热系统能

够发挥储能技术的作用,支撑新能源大规模发展,有效提高可再生能源消纳比例、参与电力系统调峰蓄热、实现清洁能源供热以及提升农村用能电气化水平。

3.2.1 消纳可再生能源

消纳问题一直是阻碍可再生能源发展的难题^[14-16]。随着碳达峰、碳中和目标的提出,可再生能源成为热点产业,可再生能源的消纳压力也日益增大。可再生能源难以消纳主要是因为自身具有随机性和不稳定性的特点,与电力系统要求的平稳和可靠性相矛盾^[16]。在这种情况下,电极锅炉蓄热系统作为新型储能装置成为了解决可再生能源消纳的关键。储能技术可以将随机波动能源变为友好能源,应用储能技术可以减缓新能源发电的随机性和波动性^[14,17],优化电网结构配置。这种情况下,电极锅炉蓄热系统能够与新能源发电联合使用,将随机波动能源变为友好能源,有效减缓新能源发电的随机性和波动性,保障电网的安全运行。

3.2.2 调峰蓄热

近年来,随着新能源发电规模的不断扩大,负荷峰谷差仍在持续增大,电力系统的调峰需求也在不断增加^[18-19]。当前,国内的电力供求十分紧张,现有的调峰资源不能够满足电网的调峰需求,导致各地机组被动参与调峰,限制了各地区机组的运行。

为缓解电网调峰压力,各地均提出了不同的应对措施。有专家指出,需要从“源-网-荷”3个方面来解决^[18]。从电网侧来讲,需要从结构上提高电网调峰能力,电极锅炉水蓄热作为新型储能技术,能够削弱用户间的热负荷关系,实现热电解耦,成为电网调峰优先考虑的一项技术。

电极锅炉水蓄热技术能够调节热发电机组的热负荷,实现更大限度的机组供能。一般来讲,热发电机组在供热期间常常由于用户侧的需求调整发电负荷。采用电极锅炉蓄热系统后,在采暖高峰期热发电机组会保持较高的发电负荷,此时用于采暖抽汽供热的负荷不用调整到一个较低的水平,结合电极锅炉本身的供热量,完全能够满足用户侧的供热需求^[20],从而优化电网资源的配置。这种新型储能系统在国内已经进行试点运行并取得了不错的经济效果。

3.2.3 清洁供暖

我国三北地区风力资源丰富,十分有利于风力行业的发展。但是由于风电难以消纳,导致弃风现象异常严重,造成了严重的资源浪费现象。由于供暖期处于风季,是电网调峰最为困难的季节,于是在北方的冬季风力发电的出力能力受到严格地限制,风力发电在保证热电机组满足供热需求的情况下被迫停运^[21]。此外,传统燃油、燃煤锅炉的使用对环境造成严重污染,不符合碳中和理念,受到严格地限制。在这种情况下,部分地区特别是三北地区如何采暖,成为首要考虑的问题。

早在 2013 年,国家能源局就在吉林白城建立了以风力发电为基础的清洁能源供暖的试点工程^[21],该项目采用高压电极锅炉与蓄热装置连用的系统,利用电网弃风的电力进行热电转化,将储存的热量进行供暖,实现了风能供暖。

与传统化石能源相比,电极锅炉蓄热系统不会造成任何的污染,而且由于热电转化效率极高,设备运行安全高效,完全可以实现清洁供暖。2019 年 7 月,蓄热电锅炉供暖项目入选能源局《北方地区冬季清洁取暖典型案例汇编》,成为国家能源局大力推广使用的新型电取暖设备之一。这种供暖方式具有建设周期短、选址范围自由灵活等特点,有利于淘汰小型燃煤锅炉,适用于区域集中供暖。同时,由于电极锅炉本身还具有“即用即启、不用即停”的强适应能力,能够适应当前风电的不稳定性,成为集中供暖下优先考虑的补充供暖模式。

3.2.4 农村电气化改革

虽然现有电极锅炉大多作为启动锅炉与核电等联合使用,但由于电极锅炉自身的广泛适用性,它不仅仅应用于联合储能系统,也可以作为能耗装置单独使用。

在国务院发布的《2030 年前碳达峰行动方案》中提出实施“碳达峰十大行动”并重点强调要推进农村地区清洁取暖,提升农村用能电气化水平^[22]。在国家优化产业结构、淘汰落后产能的过程中,电极锅炉在产业能效水平的提升以及农村用能的低碳化转型中定会发挥出至关重要的作用。

电极锅炉由于启停之间的转换和它的变负荷的

能力比较强,在微小型工业领域和农村分散式住户的供暖等方面仍然有着很大的应用空间^[23]。用户可以通过对电压电流的调整来控制热水/蒸汽产量,当用户对热水和蒸汽有使用需求时,电极锅炉能够快速地产出热水和蒸汽以满足需求;当用户不需要热水或蒸汽时,它能够保持较低负荷运行甚至直接停炉。在实现热电高效转化的同时不会对环境造成污染,符合碳达峰要求下我国农村的低碳转型要求,完全符合新形势下国家能源转型的重大战略需求。

4 存在的问题

4.1 电极材料问题

难以研发制造高安全性的电极材料仍是国内电极锅炉厂商面临的主要难题。对于电极材料,特别是碳基材料或贵金属材料中部分金属元素,如: Au, Ag 和 Zn 等为电极材料的组成成分时,在电流存在的条件下会发生电催化还原 CO_2 的反应,最终生成的 CO ^[24-25]。

同时,还需考虑到炉内腐蚀、电化学反应及高温高压高湿环境对电极材料造成的影响,所以制备高压电极时材料的选择、组分的配比及处理工艺的选择犹为重要^[26]。在电极的制作过程中,完成电极棒核心部件的制作后,还需对电极棒表面进行镀层处理以强化表面材料的性能,优化电极的抗腐蚀氧化性能。

繁琐的制备步骤和极高的工艺要求对于国内制造商提出了新的调整。由于国内电极锅炉发展较晚,国内还没有相对成熟的高压电极制备的技术,核心电极材料仍需从瑞典、加拿大等国进口,难以独立生产制造高压电极锅炉。同时,受限于现有工艺水平,国内高尖端材料难以实现高精度量化生产,测试大功率电极锅炉的实验条件难以获得,仍需进行相应的技术攻关。

4.2 水处理问题

基于电极锅炉独特的电流直接加热炉水的运行机理,电极锅炉内部的装置对于炉内水质的变化极其敏感,对于水质的要求极高,如果水质达不到要求会对电极锅炉运行稳定性和使用寿命造成很大的影响^[27],因此需要采用加药的方式来对锅炉用水进行

处理。

同传统燃煤、燃油锅炉相比,电极锅炉尤其是高压电极锅炉对于水质的要求会更高,传统的锅炉给水加药系统由于在参数调控方面具有延迟性,并且非常容易受到各种因素的干扰^[28],导致在实际使用过程中效果并不理想,并不完全适用于电极锅炉,仍需要开展进一步地研究。

4.3 腐蚀问题

同传统的火电锅炉一样,电极锅炉在运行过程中也面临着腐蚀问题。由于腐蚀过程比较缓慢,在锅炉运行初期并不明显,不会直接威胁到锅炉的安全运行,但是一旦腐蚀形成,将会直接影响到锅炉的运行,甚至引发安全事故^[9]。

对于锅炉高压电极腐蚀特性的研究,不仅要考虑到高温高压高湿环境,同时还需要考虑高压交流电对电极的腐蚀^[9]。关于高温高压高湿环境引起的腐蚀已有不少学者进行了研究,如:杨健乔、王树众等人研究了4种合金材料在700℃超临界水中的氧化行为^[29];徐鸿、邓博等人研究了一种镍基合金在高温高压超临界水中的氧化特性^[30]。

目前,对于电极锅炉腐蚀问题尤其是交流腐蚀问题研究得较少。仅有郑重等人对不同条件下电极锅炉交流腐蚀的影响因素进行了分析^[9],并且受限于实验条件分析时并未考虑到空气中氧气的干扰,实验电压受限,导致实验横向对比样本较少。现有对交流腐蚀的研究更侧重于埋地管道。如:姜子涛研究了交流线路与管道腐蚀及距离^[31];刘凯峰分析了埋管地线的交流腐蚀现状^[32]。而对于宏观的腐蚀过程研究较少,并且已有的对交流腐蚀的研究并不适用于锅炉电极的交流腐蚀过程。因此,开展对高压电极交流腐蚀的基础研究就显得格外重要。

4.4 析氢问题

虽然电极锅炉在调峰、供暖、储能等方面有着广泛的应用,但是其本身也存在着安全性问题——运行析氢。电极锅炉的基本原理是用高压电流来加热水以实现能量的转化,在这一过程中电极表面在高压作用下会伴随发生水的电解反应,交替的电流导致电极表面会间隔产生氢气与氧气。同时,由于电解水反应所需的电能很小,通常电位在2V及以上

即可发生电解水的反应^[33-34],故电解水反应贯穿电极锅炉运行的整个过程。

运行过程中产生的氢气若未及时排出,待其与氧气混合后,混合物会积聚在蒸汽发生器回路内。而氢气的爆炸极限是 4.0% ~ 75.6%,着火温度不小于 585 ℃,最低引爆能量仅为 0.02 MJ^[33]。如果聚集的氢氧混合物中氢气达到爆炸极限,在进行炉内检修时若存在明火现在或产生静电条件则会引发爆炸。

目前,国内还没有电极锅炉运行析氢的解决方案。锅炉在检修时由于明火而造成爆炉的现象仍时有发生,对锅炉维修人员造成了严重的伤害。因此,如何处理可燃性气体保证系统安全持续运行是急需解决的难题。

5 建议发展方向

通过对于行业内普遍存在的问题的分析,明确了当前国内电极锅炉行业仍然面临着诸多的技术难题。这些困难并不是在短时间内能够攻克的,仍需技术经验的积累以及科技水平的提高。对此,提议在以下几个方面来进行专业技术攻关。

5.1 电极材料和高压电极制备工艺

高压电极蒸汽发生器产业界急需攻关的方向是电转化为热的大型电极材料。目前,其仍严重依赖进口(如瑞典特种合金材料),在国内的研究及应用处于空白。需要攻克高效电化学催化剂、复合电极及非石棉复合隔膜材料开发三大技术性难题,建立起能够制备符合国际标准电极的电极体系。

高压电极难以大规模生产制作的关键问题之一是其电化学催化剂问题。金属铂是一种非常理想高效的电化学催化剂,但是高昂的价格致使其难以实现电极的量产。有人提出将铂催化剂分散于不同的载体制成复合电极材料,但是在制作过程中不仅要考虑到催化剂的活性、尺寸和表面功能群等性状,还需要考虑到电子特性和磁化特性,这对于国内工艺技术提出了新的挑战。非石棉复合隔膜材料开发是电极制备行业面临的一个难题,其核心制备技术一直掌握在国外公司,国内目前还处于研究阶段,仍需开展进一步地研究。

5.2 电极锅炉运行过程中离子检测与控制

为提高蒸汽发生器的安全系数,避免水介质中的电解水析氢反应的进行,在保证蒸汽发生器电流传导性满足运行需求的同时,需降低水中腐蚀炉体、促进析氢反应的金属离子含量。

为了控制蒸汽发生器水呈碱性、减少氧气与碳酸含量,需要对水进行软化和脱盐;同时,还需控制炉水中离子不能在炉内形成腐蚀或者水垢,且不能随着热水蒸汽发生器温度升高而有过高的反应活性。因此,建议在电极锅炉外部设置实时离子监测系统、除盐装置及加药剂量控制装置。

5.3 高湿环境下 H₂ 高灵敏度检测

三电机交流电作用下,因各种离子的存在使水中存在电子移动,电极表面在高压作用下会伴随发生水的电解反应,交替的电流导致电极表面会间隔产生氢气与氧气。如果产生的氢气达到爆炸极限,在进行炉内检修时,在明火或产生静电的情况下,会引燃氢氧混合物,发生爆炸。

因此,建议构建一套实时监测氢气化合气组分分析的系统,能够精准捕集氢气组分输出信号,并正向反馈给电极系统,进行参数调节响应,及时阻断析氢反应进行,严格控制氢气化合气成分比例低于爆炸极限。

5.4 高压电极锅炉本体与安全防护系统

高压电极锅炉的加热功率调节主要是通过调节与电极的接触水量来实现的,即通过改变电极间的电阻实现电功率转换为热功率。高压电极采用浸没式,电极与炉水直接接触,加热功率可以在 5% ~ 100% 范围内调节。

建议对锅炉的本体材料、金属筒体绝缘隔离的安全防护进行重点研究。对于筒体材料来说,一方面,要防止筒体中的碱性工质对筒体材料造成影响,包括盾体材质、进水管材质和升降设备材质选择等;另外一方面,需要做好安全绝缘保护,主要包括进出口介质管道、接地保护、高压电极绝缘及升降设备绝缘等。

在发生器运行安全方面,建议设置必要数量的安全阀,保护水被蒸干或者全部产生蒸汽的风险。对于整个锅炉运行系统需设置安全温度控制保护、

压力控制保护、水量控制保护、漏电保护和产漏氢保护等安全保护系统。

6 总结与展望

对于电极锅炉的基本结构原理、当前行业现状、应用现状与前景以及当前存在的问题进行了分析,总结如下:

(1) 我国电极锅炉企业已经从与海外厂家合作引进技术并改进的时期逐步过渡到通过自身技术突破在中/低压电极锅炉领域实现了自主生产制造,但是在高压电极锅炉方面仍然面临着诸多难题,还需要进一步地研究。

(2) 电极锅炉作为核电站辅助启动锅炉,在机组启动及紧急停堆时发挥着不可替代的作用。“双碳”目标战略规划下,未来电极锅炉配合储热系统在消纳风力、光伏等可再生能源发电、储汽蓄热参与电网调峰、电热高效转换实现冬季清洁供暖与提高农村电气化水平等方面应用前景广阔。

(3) 当前电极锅炉制造业普遍存在的问题在于水质、材料、腐蚀与析氢 4 个方面。高压电极锅炉对于水质要求极高,传统的锅炉给水加药系统并不完全适用;高压电极材料仍然严重依赖进口国内仍难以实现自主大规模量产;国内有关电极锅炉腐蚀尤其交流腐蚀问题的研究受实验条件限制,发展缓慢;运行过程中电解反应产生的 H_2 、 CO 等可燃性气体处理是系统安全持续运行急需解决的难题。

解决当前我国电极锅炉行业面临难题,建议从以下几方面技术进行重点突破:

(1) 需攻克高效电化学催化剂、复合电极及非石棉复合隔膜材料开发 3 大难关,制备达到国家和行业标准的高压电极。

(2) 揭示 H_2 、 CO 的生成规律并研发抑制技术与高效处理装置。

(3) 构建实时监测氢气化合气组分分析系统,以应对运行过程重大高湿环境对于 H_2 高灵敏度检测所造成的影响。

(4) 重点研究电极锅炉的本体材料、金属筒体绝缘隔离的安全防护,构建高压电极蒸汽发生器本体与安全保护系统。

参考文献:

- [1] 任大伟,侯金鸣,肖晋宇,等. 能源电力清洁化转型中的储能关键技术探讨[J]. 高电压技术,2021,47(8):2751-2759.
REN Da-wei, HOU Jin-ming, XIAO Jin-yu, et al. Exploration of key technologies for energy storage in the cleansing transformation of energy and power[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2751-2759.
- [2] 郭海涛,胡明禹,徐 静. 2021 年中国能源政策回顾与 2022 年调整方向研判[J]. 国际石油经济,2022,30(2):11-18.
GUO Hai-tao, HU Ming-yu, XU Jing. Review of China's energy policies and the adjustment orientation in 2022[J]. International Petroleum Economics, 2022, 30(2): 11-18.
- [3] 吴霖鑫. 基于消纳弃风的电制热-供热系统性能与经济性分析[D]. 北京:华北电力大学,2020.
WU Lin-xin. Performance and economic analysis of heat generation and supply system by accommodating abandoned wind[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [4] 周 颖. 风光资源互补特性分析及联合优化调度研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2021.
ZHOU Ying. Analysis of complementary characteristics of wind and solar resources and research on joint optimal dispatch[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2021.
- [5] 朱 晔,徐石明,周德群,等. 新型电力系统中储能政策分析和未来发展思考[J]. 中国能源,2021,43(11):48-55.
ZHU Ye, XU Shi-ming, ZHOU De-qun, et al. Policy analysis and future development of energy storage in new power system[J]. Energy of China, 2021, 43(11): 48-55.
- [6] 康重庆,陈 辉,赵宇明,等. 以高压电极式电锅炉为核心的高性能分布式电热能源系统[J]. 南方电网技术,2017,11(10):35-44.
KANG Chong-qing, CHEN Hui, ZHAO Yu-ming, et al. High-performance distributed electro-thermal energy system centered on the high voltage electrode electric boiler [J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(10): 35-44.
- [7] VILMA V, SAEED S A, BEHNAM Z, et al. Market power with combined heat and power production in the Nordic energy system [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 5263-5275.
- [8] 谢华宝,戴 赛,许 丹,等. 热网特性对弃风消纳效果的影响研究[J]. 电力自动化设备,2020,40(5):24-31.
XIE Hua-bao, DAI Sai, XU Dan, et al. Influence of heat network characteristics on abandoned wind absorption effect [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 24-31.

- [9] 郑 重. 锅炉高压电极腐蚀特性研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2021.
- ZHENG Zhong. Study on corrosion characteristics of boiler high-voltage electrode[D]. Urumchi: Xinjiang University, 2021.
- [10] 陈卫波,戴刚平,陈 超,等. 高压电极锅炉技术研究发展综述[J]. 科技经济导刊,2019(3):65-66.
- CHEN Wei-bo, DAI Gang-ping, CHEN Chao, et al. Review of research and development of high-pressure electrode boiler technology[J]. Technology and Economic Guide, 2019(3):65-66.
- [11] 郭 锋,夏青扬,刘 杨. 浸没式电极锅炉原理及应用[J]. 能源研究与管理,2012(2):65-67.
- GUO Feng, XIA Qing-yang, LIU Yang. Theory and application of immersion-type electrode boiler[J]. Energy Research and Management, 2012(2):65-67.
- [12] 殷仁豪,卢海勇,王 鹏. 电蓄热锅炉集中供暖技术研究[J]. 上海节能,2020(7):776-783.
- YIN Ren-hao, LU Hai-yong, WANG Peng. Research on central heating supply technology with electric heat storage boiler[J]. Shanghai Energy Saving, 2020(7):776-783.
- [13] 郭 锋,夏青扬,刘 杨. 浸没式电极锅炉在核电厂的应用[J]. 热力发电,2012,41(1):88.
- GUO Feng, XIA Qing-yang, LIU Yang. Application of submerged electrode boiler in nuclear power plant[J]. Thermal Power Generation, 2012, 41(1):88.
- [14] 方劲宇,宋子秋,韩晓娟,等. 储能协调蓄热式电锅炉主动消纳风电的方法研究[J]. 电器与能效管理技术,2017(13):16-21.
- FANG Jin-yu, SONG Zi-qiu, HAN Xiao-juan, et al. Study on wind power consumption method using energy storage technology to coordinate heat storage electric boilers[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2017(13):16-21.
- [15] 李建林,谢志佳,李德鑫,等. 蓄热式电锅炉提升风电消纳能力关键技术研究[J]. 电器与能效管理技术,2018(1):1-7.
- LI Jian-lin, XIE Zhi-jia, LI De-xin, et al. Research on key technology of electric boiler with thermal energy storage in facilitating wind power accommodation capacity[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2018(1):1-7.
- [16] 杨经纬,张 宁,王 毅,等. 面向可再生能源消纳的多能源系统:述评与展望[J]. 电力系统自动化,2018,42(4):11-24.
- YANG Jing-wei, ZHANG Ning, WANG Yi, et al. Multi-energy system towards renewable energy accommodation: review and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4):11-24.
- [17] 赵 良,白建华,辛颂旭,等. 中国可再生能源发展路径研究[J]. 中国电力,2016,49(1):178-184.
- ZHAO Liang, BAI Jian-hua, XIN Song-xu, et al. Study on development path of renewable energy in China[J]. Electric Power, 2016, 49(1):178-184.
- [18] 刘庆超,张清远,许 霞. 蓄热电锅炉在风电限电地区进行调峰蓄能的可行性分析[J]. 华电技术,2012,34(9):75-78.
- LIU Qing-chao, ZHANG Qing-yuan, XU Xia. Analysis on feasibility of heat storing electric boiler application for energy storage and peak shaving to increase utilization rate of wind power capacity[J]. Huadian Technology, 2012, 34(9):75-78.
- [19] 秦 冰,付 林,江 亿. 利用系统热惯性的热电联产电力调峰[J]. 煤气与热力,2005,25(10):6-8.
- QIN Bing, FU Lin, JIANG Yi. Electric peak shaving for CHP plant by using thermal inertia of heat-supply system[J]. Gas & Heat, 2005, 25(10):6-8.
- [20] 孙萌萌,王 雷. 采用电极锅炉蓄能的调峰方法经济性分析[J]. 沈阳工程学院学报:自然科学版,2019,15(4):327-331.
- SUN Meng-meng, WANG Lei. Economic analysis of peak regulation method in heat grid with electrode boiler for energy storage[J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science), 2019, 15(4):327-331.
- [21] 范高锋,张 楠,梁志锋,等. 我国“三北”地区弃风弃光原因分析[J]. 华北电力技术,2016(12):55-59.
- FAN Gao-feng, ZHANG Nan, LIANG Zhi-feng, et al. Analysis on the "Three Norths" region wind and PV power limitation of China[J]. North China Electric Power, 2016(12):55-59.
- [22] 张 涛.《2030年前碳达峰行动方案》解读[J]. 生态经济,2022,38(1):9-12.
- ZHANG Tao. Interpretation of "action plan of peak carbon dioxide emissions until 2030"[J]. Ecological Economy, 2022, 38(1):9-12.
- [23] 康 慧,孙宝玉,李瑞国. 我国清洁供暖问题探考[J]. 中国能源,2017,39(8):7-10.
- KANG Hui, SUN Bao-yu, LI Rui-guo. A probe into the problem of clean heating in China[J]. Energy of China, 2017, 39(8):7-10.
- [24] 龙 玲. 过渡金属基纳米电催化剂的设计及其电催化应用[D]. 合肥:中国科学技术大学,2021.
- LONG Ling. Design of transition metal-based nanometer electrocatalyst and its electrocatalytic application[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021.
- [25] 周婷婷. 过渡金属(氢)氧化物纳米阵列的制备及其能源转化与存储应用的研究[D]. 青岛:山东大学,2017.

ZHOU Ting-ting. Preparation of transition metal (hydrogen) oxide nanoarrays and research on their energy conversion and storage applications [D]. Qingdao:Shandong University, 2017.

[26] 张 杰,耿华龙. 长寿命电极锅炉电极棒及其制备方法: CN111363979A[P]. 2020-07-03.

ZHANG Jie, GENG Hua-long. Long-life electrode rod of electrode boiler and its preparation method; CN111363979A [P]. 2020-07-03.

[27] 叶元华,陈志高,陈 超,等. 高压电极锅炉水处理系统的研究[J]. 电子世界, 2019(1):142-143.

YE Yuan-hua, CHEN Zhi-gao, CHEN Chao, et al. Research on water treatment system of high-voltage electrode boiler[J]. Electronics World, 2019(1):142-143.

[28] 徐孝明,梁延良,王钟毅,等. 电极锅炉高温循环热水系统用定压膨胀补水排气装置:CN208671388U[P]. 2019-03-29.

XU Xiao-ming, LIANG Yan-liang, WANG Zhong-yi, et al. Constant pressure expansion water supply and exhaust device for high temperature circulating hot water system of electrode boiler; CN208671388U [P]. 2019-03-29.

[29] 杨健乔,王树众,王家欢,等. 先进超超临界电站锅炉 4 种候选材料在 700℃超临界水中的氧化行为[J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(2):18-26.

YANG Jian-qiao, WANG Shu-zhong, WANG Jia-huan, et al. Oxidation behaviors of four candidate materials for the advanced ultra-supercritical water power plant in supercritical water at 700℃[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(2):18-26.

[30] 徐 鸿,邓 博,朱忠亮,等. Haynes 282 镍基合金在 600 ~ 700 ℃超临界水中的氧化特性[J]. 机械工程材料, 2018, 42(3):1-8.

XU Hong, DENG Bo, ZHU Zhong-liang, et al. Oxidation characteristics of Haynes 282 nickel-based alloy in supercritical water at 600-700 ℃[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2018, 42(3):1-8.

[31] 姜子涛,周 冰,董绍华,等. 交流输电线路对管道腐蚀影响的安全距离研究[J]. 石油科学通报, 2021, 6(4):638-647.

JIANG Zi-tao, ZHOU Bing, DONG Shao-hua, et al. Research on safety distances between AC transmission lines and buried pipelines for mitigating AC corrosion[J]. Petroleum Science Bulletin, 2021, 6(4):638-647.

[32] 刘凯峰. 埋地管线钢交流腐蚀行为研究现状分析[J]. 石油和化工设备, 2020, 23(11):88-90.

LIU Kai-feng. Analysis of AC corrosion behavior of buried pipeline steel [J]. Petroleum and Chemical Equipment, 2020, 23(11):88-90.

[33] 俞红梅,邵志刚,侯 明,等. 电解水制氢技术研究进展与发展建议[J]. 中国工程科学, 2021, 23(2):146-152.

YU Hong-mei, SHAO Zhi-gang, HOU Ming, et al. Hydrogen production by water electrolysis: progress and suggestions[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(2):146-152.

[34] LIU X, CHI J, DONG B, et al. Recent progress in decoupled H₂ and O₂ production from electrolytic water splitting[J]. ChemElectroChem, 2019, 6(8):2157-2166.

(丛 敏 编辑)