

# 超临界二氧化碳动力系统耐热材料 高温腐蚀研究进展

梁志远，桂雍，赵钦新

(西安交通大学 能源与动力工程学院 热流科学与工程教育部重点实验室，西安 710049)

**摘要：**主要介绍了超临界二氧化碳环境下耐热材料的抗腐蚀性能，重点阐述了超临界二氧化碳温度、压力、杂质气体 H<sub>2</sub>O 和含硫气体对耐热材料腐蚀行为及抗腐蚀性能的影响规律；同时论述了超临界二氧化碳关键高温部件材料选型及其腐蚀机理研究。最后介绍了耐热材料在超临界二氧化碳中的腐蚀机理及未来的研究方向。

**关键词：**超临界二氧化碳；耐热材料；腐蚀；温度；杂质气体

**DOI：**10.7643/issn.1672-9242.2020.07.016

**中图分类号：**TG172      **文献标识码：**A

**文章编号：**1672-9242(2020)07-0088-06

## High Temperature Corrosion Research Progress of Heat-resistant Materials in Supercritical Carbon Dioxide

LIANG Zhi-yuan, GUI Yong, ZHAO Qin-xin

(MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, College of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**ABSTRACT:** This paper introduced the corrosion resistance of heat-resisting materials in supercritical carbon oxide. The effects of temperature, pressure, foreign gas H<sub>2</sub>O and sulfurous gas on the corrosion behavior and corrosion resistance were focused. Moreover, materials selection and corrosion mechanism in supercritical carbon dioxide system were discussed. Lastly, the corrosion mechanism and research direction of materials in supercritical carbon dioxide were introduced.

**KEY WORDS:** supercritical carbon dioxide; heat-resistant materials; corrosion; temperature; foreign gas

超临界二氧化碳循环发电系统具有能量转化效率高、关键部件和系统所占空间小、节水巨大和经济性显著等优点。相对于传统蒸汽工质的朗肯循环，超临界二氧化碳循环发电技术优势显著，被认为是新能源领域最具应用前景的能量转换系统之一，该技术可应用于舰船发电、燃气轮机和燃煤发电等领域。在同等级的运行参数下，超临界二氧化碳发电系统的循

环效率比蒸汽循环系统高约 5%。20 世纪 70 年代，研究人员认识到在闭合布雷顿循环中以超临界二氧化碳为工质，利用少量的压缩功，可以使系统达到更高的转换效率<sup>[1-3]</sup>。限于当时透平机械和紧凑式换热器的制造加工技术，超临界二氧化碳循环发电技术未得到发展及应用。近几年，美国、日本和中国等国家相继在核电、太阳能发电和火电等领域开展超临界二

收稿日期：2020-01-13；修订日期：2020-02-12

Received: 2020-01-13; Revised: 2020-02-12

基金项目：国家自然科学基金（51806166）；博士后创新人才计划（BX20190269）；中央高校基本业务费

Fund: National Natural Science Foundation of China (51806166); Postdoctoral Innovative Talent Program (BX20190269) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities

作者简介：梁志远（1989—），男，博士，副教授，主要研究方向为锅炉安全及材料环境行为。

Biography: LIANG Zhi-yuan (1989—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: boiler safety and material environmental behavior.

氧化碳循环发电系统与关键技术的研究<sup>[4-10]</sup>。清华大学、上海发电设备成套设计研究院、工程热物理研究所、西安热工研究院等科研机构开展了超临界二氧化碳循环发电系统设计、优化和关键部位材料选型研究<sup>[7-10]</sup>。

现阶段超临界二氧化碳循环发电系统研究的重点逐渐转移到系统长周期安全高效运行。超临界二氧化碳循环系统中二氧化碳工质与系统关键高温部件直接接触, 系统设计参数选择和高效安全运行依赖于工质与材料间的稳定性。同时, 结合现役燃煤发电机组的蒸汽氧化问题频发, 为确保系统的高效安全运行, 系统关键高温部件材料的腐蚀及腐蚀寿命预测问题成为关键因素之一。2011 年以来, 超临界火电机组因蒸汽工质侧腐蚀问题频繁爆管停机, 单次事故造成数以千万元的经济损失。与超临界水蒸气相比, 超临界二氧化碳工质具有特殊性, 其腐蚀过程中碳的渗入及反应增加了研究的复杂性。超临界二氧化碳发电技术优势、国家能源装备实施方案和学科知识体系拓展促进了超临界二氧化碳腐蚀过程的深入研究。同时超临界二氧化碳腐蚀过程中离子扩散规律和反应产物生长决定耐热材料的抗腐蚀性能, 因此, 研究超临界二氧化碳环境耐热材料腐蚀行为、机理及防控技术具有重要的科学和应用意义。

文中主要综述了超临界二氧化碳条件下典型耐热材料的腐蚀行为及机理, 同时探讨了超临界二氧化碳腐蚀的未来研究方向。

## 1 超临界二氧化碳环境对材料腐蚀性能的影响规律

### 1.1 温度和压力的影响

在强大的应用背景下, 国内外科研机构积极开展了超临界二氧化碳环境下系统关键高温部件用材腐蚀性能的研究。由于超临界二氧化碳环境的氧分压远高于形成金属氧化物所需的氧分压(如图 1 所示), 例如, 参数为 20 MPa、600 °C 的超临界二氧化碳中的氧分压为  $10^{-8}$  MPa, 远高于形成氧化铁所需的氧分压  $10^{-15}$  MPa, 因此耐热钢及合金发生腐蚀。

超临界二氧化碳温度、压力及杂质等环境参量对耐热材料抗腐蚀性能的影响对系统关键部件材料选型与系统安全运行具有重要的意义。超临界二氧化碳的温度和压力参量直接影响整个布雷顿循环系统的能效, 同时也决定材料的腐蚀程度。温度对材料腐蚀性能的影响主要依据 Arrhenius 扩散理论, 因为材料高温腐蚀过程受扩散控制。Ho Jung Lee 等人<sup>[11]</sup>的研究结果表明, 温度加速材料的腐蚀。Nakanishi<sup>[12]</sup>发现超临界二氧化碳条件下金属腐蚀的主要问题是剥落, 腐蚀层的剥落与环境参数有直接关系。Furukawa 等

人<sup>[13]</sup>和 Pint<sup>[14]</sup>等人的实验结果表明, 实验压力对耐热材料的腐蚀作用较小, 但实验结果缺乏理论证实。同时, 超临界二氧化碳布雷顿循环系统材料腐蚀是新兴的能源与材料领域的研究热点, 超临界二氧化碳材料腐蚀无系统的研究, 无材料腐蚀的量化表征方程, 因此系统地研究超临界二氧化碳温度和压力参量对腐蚀的影响对布雷顿循环系统安全具有重要的意义。

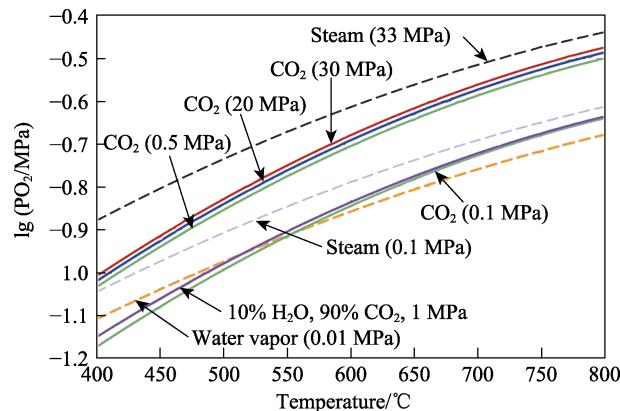


图 1 超临界二氧化碳环境中氧分压随温度压力的变化  
Fig.1 Oxygen partial pressure varying with temperature and pressure in supercritical carbon dioxide

### 1.2 水蒸气杂质

超临界二氧化碳布雷顿循环系统中水蒸气是最有可能出现的杂质气体之一, 水蒸气大大提高了材料在超临界二氧化碳中的腐蚀速率。目前多数研究侧重于低温条件下二氧化碳掺杂水蒸气对材料腐蚀性能的影响规律, 如低温下碳钢表面发生严重的点蚀。Pfenning 等人<sup>[15-16]</sup>推测了材料的点蚀腐蚀机理, 主要利用了含水环境中二氧化碳的自催化作用。Nesic 等人<sup>[17]</sup>研究了水蒸气含量对超临界二氧化碳环境中材料的腐蚀性能的影响规律, 研究表明, 水蒸气含量增加, X65 管线钢的腐蚀速率可相差 50 倍。

关于高温高压的二氧化碳环境下水蒸气杂质对材料腐蚀性能的影响研究, 目前处于空白状态。关于高温空气或氧气环境中水蒸气对金属高温氧化的影响已有研究。赵双群和谢锡善<sup>[18]</sup>对 Ni-Cr-Co 基高温合金在含水蒸气的空气中的高温腐蚀行为进行了研究。证实水蒸气加速了合金的腐蚀速度。总的说来, 与干燥氧化环境相比, 氧气/水蒸气或空气/水蒸气环境下, 金属氧化速度明显加快。为解释水蒸气能够加速金属高温氧化现象, 研究人员提出了水分解机制<sup>[19-20]</sup>、氢缺陷氧化机制<sup>[21]</sup>、经微裂纹或微通道接触氧化机制<sup>[22]</sup>和铬蒸发氧化机制<sup>[23-24]</sup>。其中, 比较有说服力的是 Fujii 等人<sup>[19-20]</sup>提出的水分解机理。而超临界二氧化碳环境下掺杂水蒸气对材料腐蚀的影响及相应的腐蚀机制是否适合以上机制, 仍处于未知, 因此亟需开展对应的实验研究。

### 1.3 含硫气体杂质

研究表明,含硫气体杂质(如二氧化硫等),会加快超临界二氧化碳条件下材料的腐蚀速率。Choi 等人<sup>[25]</sup>发现,添加 1% 的二氧化硫引起超临界二氧化碳环境中碳钢发生灾难性腐蚀,腐蚀速率从 0.38 mm/a 提高到 5.6 mm/a。Xiang 等人<sup>[26]</sup>提出掺杂二氧化硫后,腐蚀产物有  $\text{FeCO}_3$  和  $\alpha\text{-FeOOH}$  转变为  $\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ,生成的结晶化合物结构松散且保护性差。而 Choi 等人通过实验发现,二氧化硫杂质对碳钢在超临界二氧化碳的腐蚀速率呈数量级倍数增加。该研究结果建立于低温条件下,所研究材料为低端钢材,而材料在高温二氧化硫杂质的超临界二氧化碳中的腐蚀研究尚未开展。因此,研究含二氧化硫杂质的超临界二氧化碳中的材料的腐蚀行为具有重要的意义。

超临界二氧化碳温度、压力参量和杂质气体对材料的腐蚀速率有直接关系。已经证实,超临界二氧化碳的温度和水蒸气杂质会加速材料的腐蚀,而压力作用机理尚未研究,除超临界二氧化碳中含有的杂质气体(如  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{O}_2$  和  $\text{SO}_2$ )外,环境和材料界面在高温下会形成二次反应中间产物(如 C、CO 和  $\text{H}_2$  等),其中杂质气体和二次反应产物以及金属界面的作用机理尚未研究。

## 2 关键部位材料选型及腐蚀研究

铁素体和奥氏体耐热钢已大范围应用于大型燃煤发电和核电站,低 Cr 耐热钢因较低的热膨胀系数和较高的热传导系数,是大口径管道及集装箱的最佳材料。奥氏体耐热钢的高温性能优越,因而是过热器和再热器的最佳材料。高参数蒸汽环境下耐热钢及合金的氧化腐蚀特性研究起步较早,国内外多家高校、单位和实验室研究了典型耐热钢和高温合金的蒸汽氧化腐蚀行为,氧化腐蚀机理已形成共识,而超临界二氧化碳环境下耐热材料的腐蚀行为及相关机理研究较少。已有研究表明,超临界二氧化碳环境下耐热钢及合金的抗腐蚀性能决定于材料的成分<sup>[11-14,27-31]</sup>。耐热钢及合金中高 Cr 和高 Ni 含量提高材料的抗腐蚀性能,如 9Cr 马氏体耐热钢的腐蚀速率远高于 18Cr 奥氏体耐热钢及合金<sup>[14,30-31]</sup>。同时,微量元素会影响材料的抗腐蚀性能<sup>[32-35]</sup>,研究表明,元素 Mn 和 Si 通过在耐热钢表面优先形成连续且致密的氧化膜,提高了耐热钢的抗腐蚀性能<sup>[33-34]</sup>。

Newcob<sup>[35]</sup>报道了 9Cr 合金在超临界二氧化碳环境中氧化膜剥落的研究内容。Furukawa<sup>[13]</sup>公布了 12Cr 和 316L 钢在超临界二氧化碳环境下的腐蚀特性,结果表明,钢的腐蚀速率由温度控制,在氧化膜与基体界面处发现了渗碳层,渗碳层形成的过程可用式(1)—(3)解释<sup>[35]</sup>:



式中: M 代表金属; MO 代表金属氧化物; C 代表活性碳。

针对更先进的布雷顿循环系统,镍基合金更适用于高温高压的环境中,如核电领域中蒸汽发生器和 U 型管部件合金均采用镍基合金,而对超临界二氧化碳环境下镍基合金的腐蚀情况研究很少。Firouzdor 等人<sup>[36]</sup>研究了镍基合金 PE-16、Haynes230 和 In625 在超临界二氧化碳气氛中的腐蚀性能,研究表明,三种镍基合金的抗腐蚀性能优于 Al-6XN 合金,得益于镍基合金中高的铬和镍含量。Cao 等人<sup>[37]</sup>对比了超临界二氧化碳气氛下 800H、316 和 310 的腐蚀性能,800H 具有最优的耐腐蚀能力。

超临界二氧化碳对耐热材料的腐蚀除了耐热材料表面的氧化反应,研究人员还发现氧化层与耐热钢基体之间发生渗碳反应<sup>[36-38]</sup>。主要原因是二氧化碳吸附于耐热材料表面,发生分解并与耐热材料发生化学反应,碳的引入诱发了渗碳反应的发生,而超临界水氧化材料断面无渗碳行为,如图 2 所示。赵钦新团队在高温二氧化碳腐蚀中也发现类似的渗碳行为,通过辉光放电结果发现渗碳区中碳含量远高于耐热钢基体。与超临界水腐蚀行为相比,超临界二氧化碳环境下耐热材料的腐蚀机理由氧化机制转变为氧化-渗碳耦合机制。由于氧离子半径大于碳离子半径,离子的扩散途径及速率发生改变,而渗入基体的碳与抗腐蚀性能元素铬结合形成碳化物,从而形成渗碳区,该区

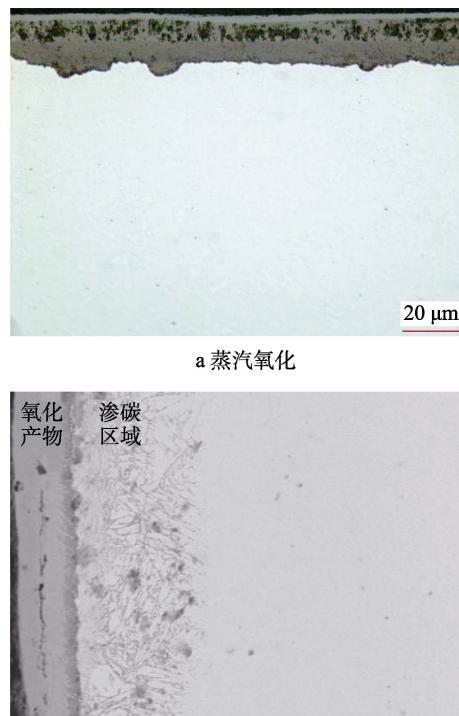


图 2 蒸汽和超临界二氧化碳气氛中腐蚀断面形貌

Fig.2 Cross-sectional morphology of corrosive samples in steam (a) and supercritical carbon dioxide (b)

域位置如图 3 所示。该渗碳区是联系耐热钢表面氧化物与基体的枢纽, 与腐蚀过程中金属阳离子的向外扩散和腐蚀性阴离子的向内扩散密切相关, 因而渗碳区中离子扩散速率直接决定耐热钢腐蚀速率。除此之外, 大量碳离子向内迁移优先与金属反应形成沉淀型碳化物, 降低渗碳区中可移动铬的含量, 因此腐蚀机制更为复杂。同时研究发现渗碳行为优先发生于晶界处, 与金属元素反应消耗大量固溶元素。一方面耐热材料的应力腐蚀可能加剧, 在焊缝和弯头处造成严重的后果; 另一方面渗碳行为削弱了表面腐蚀层的附着力, 增大了腐蚀层剥落和蠕变失效的趋势<sup>[36,38-41]</sup>。

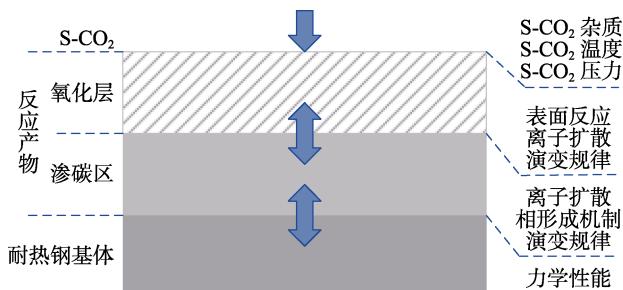


图 3 超临界二氧化碳腐蚀的关键机理问题及影响因素

Fig.3 Key mechanism and effects of corrosion in supercritical carbon dioxide

国内上海发电成套设计研究院、西安交通大学和华北电力大学相继展开了超临界二氧化碳腐蚀研究, 其中赵钦新课题组开展了高温二氧化碳环境下耐热材料腐蚀的先期研究<sup>[38-42]</sup>, 搭建了高温和二氧化碳腐蚀实验系统, 发现铁素体和奥氏体耐热钢的腐蚀动力学遵循抛物线腐蚀规律(如图 4 所示), 得出增加 Cr 含量可提高材料的抗腐蚀性能的结论。研究结果表明, 二氧化碳腐蚀过程中碳和氧元素不断向耐热材料基体扩散, 而金属离子不断由耐热材料基体向外扩散。在氧化物与材料基体之间发现了渗碳区域, 通过辉光放电光谱结果发现该处碳含量高于其他位置(如图 5 所示), 并随时间不断向耐热材料基体延伸。在含杂质

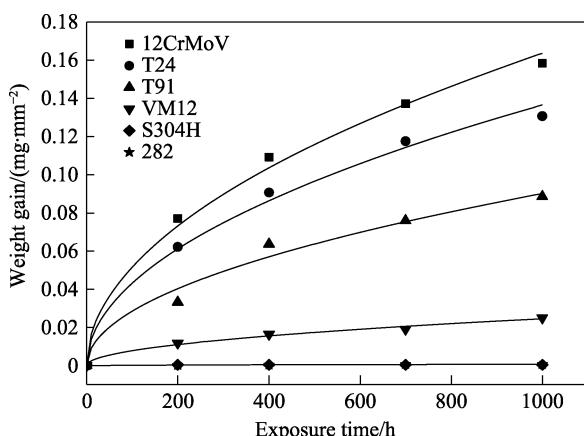
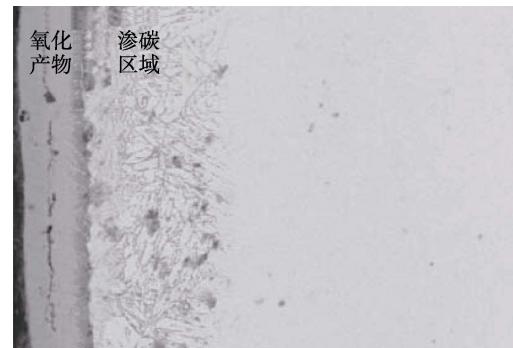
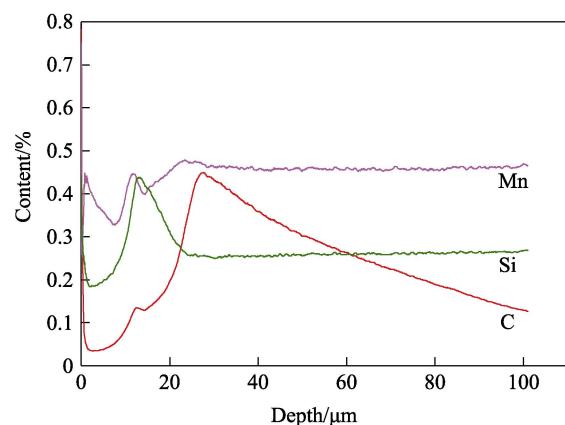


图 4 600 °C下 6 种材料的腐蚀动力学曲线

Fig.4 Corrosion kinetics curves of six materials at 600 °C



a 腐蚀反应产物截面形貌



b 辉光光谱碳、硅和锰元素分布

Fig.5 Cross-sectional morphology of corrosion reaction product (a) and Glow spectrum distribution

of C, Mn and Si (b)

气体水蒸气的二氧化碳环境中, 初步得出水蒸气加速了铁素体耐热钢的腐蚀的规律。除碳渗入形成复杂碳化物之外, 发现部分碳在奥氏体耐热钢表面缺陷处沉积或反应, 形成独立的颗粒状腐蚀产物, 该发现丰富了超临界二氧化碳腐蚀过程中碳元素的迁移规律。

### 3 未来研究方向

基于超临界二氧化碳布雷顿循环系统高效紧凑的优点, 目前各国开始着手研究环境状态参量对材料腐蚀性能的影响规律, 尚未形成超临界二氧化碳环境下材料腐蚀的量化表征方程, 用于腐蚀性能评估和寿命预测, 并且发表的研究工作的应用背景不同, 二氧化碳参数和测试材料也不同, 无法形成较为全面的材料腐蚀数据库, 无法进行耐热材料抗腐蚀性能的评估及研究。

对应用广泛的耐热材料, 如大型火电发电关键部件的耐热材料, 材料的腐蚀数据及研究对比目前报道较少, 而主要合金元素对超临界二氧化碳环境中耐热材料腐蚀的影响更为稀缺<sup>[43-44]</sup>。针对汽轮机转子和叶片材料, 超临界二氧化碳条件下材料的疲劳性能也亟待研究。除此之外, 超临界二氧化碳材料腐蚀防控技术方面的研究也亟需开展。基于超临界二氧化

碳腐蚀过程中渗碳层的出现，传统喷丸处理和细晶粒处理<sup>[45-48]</sup>是否适用于提高材料的耐腐蚀性能仍属未知。因此，急需系统地开展材料腐蚀试验及防控技术研究。

## 4 结语

1) 世界范围内积极开展了超临界二氧化碳环境下材料腐蚀行为及机理的研究，但超临界二氧化碳温度、压力、杂质及实验参数各异，实验结果未呈现出统一性。

2) 超临界二氧化碳腐蚀过程中渗碳层的出现不仅会诱发增加腐蚀产物的剥落，而且进入基体的C与Cr反应降低了材料的抗腐蚀性能。材料的抗腐蚀性能评价指标随渗碳层的出现而改变，应考虑渗碳层和贫Cr区。

3) 基于超临界二氧化碳系统的优势，不仅需要评价超临界二氧化碳条件下材料抗腐蚀性能而且应考虑如何提高材料的抗腐蚀性能。

## 参考文献：

- [1] ANGELINO G. Carbon Dioxide Condensation Cycles for Power Production[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1968, 90(3): 287-295.
- [2] YANTOVSKII E I, WALL G, LINDQUIST L, et al. Ergonomics of the OCDOPUS Project[J]. Energy Conversion and Management, 1993, 34(9-11): 1213-1218.
- [3] MATHIEU P, NIHART R. Zero-emission MATIANT Cycle[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1999, 121(1): 116-121.
- [4] MONJE B, SÁNCHEZ D, SAVILL M, et al. A Design Strategy for Supercritical CO<sub>2</sub> Compressors[C]// Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition. Düsseldorf, Germany, 2014.
- [5] CHA J E, LEE T H, EOH J H, et al. Development of a Supercritical CO<sub>2</sub> Brayton Energy Conversion System Coupled with a Sodium Cooled Fast Reactor[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2009, 41(8): 1025-1044.
- [6] BRESE R G, KEISER J R, PINT B A. Effect of Thermal Cycling on Compatibility in CO<sub>2</sub> for Concentrated Solar Power Applications[J]. Oxidation of Metals, 2017, 87(5-6): 631-642.
- [7] 段承杰, 杨小勇, 王捷. S-CO<sub>2</sub>布雷顿循环的参数优化[J]. 原子能科学技术, 2011, 45 (12): 1489-1494.  
DUAN Cheng-jie, YANG Xiao-yong, WANG Jie. Parameters Optimization of Supercritical Carbon Dioxide Brayton Cycle[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2011, 45(12): 1489-1494.
- [8] 梁墩煌, 张尧立, 郭奇勋, 等. 核反应堆系统中以超临界二氧化碳为工质的热力循环过程的建模与分析[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2015, 54(5): 608-613.  
LIANG Dun-huang, ZHANG Yao-li, GUO Qi-xun. Modeling and Analysis of Nuclear Reactor System Using Supercritical-CO<sub>2</sub> Brayton Cycle[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2015, 54(5): 608-613.
- [9] 颜见秋, 李富, 周旭华, 等. 气冷快堆燃料组件均匀化初步研究[J]. 原子能科学与技术, 2009, 43(7): 626-629.  
YAN Jian-qiu, LI Fu, ZHOU Xu-hua, et al. Homogenization of Fuel Assembly of Gas-cooled Fast Reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009, 43(7): 626-629.
- [10] 张一帆, 王生鹏, 刘文娟, 等. 超临界二氧化碳再压缩再热火力发电系统关键参数的研究[J]. 动力工程学报, 2016, 36(10): 827-833.  
ZHANG Yi-fan, WANG Sheng-peng, LIU Wen-juan, et al. Study on Key Parameters of a Supercritical Fossil-fired Power System with CO<sub>2</sub> Recompression and Reheat Cycles[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2016, 36(10): 827-833.
- [11] LEE H J, KIM H, JANG C. Compatibility of Candidate Structural Materials in High-temperature S-CO<sub>2</sub> Environment[C]// The 4th International Symposium Supercritical CO<sub>2</sub> Power Cycles. Pittsburgh, Pennsylvania, 2014.
- [12] FIROUZDOR V, SRIDHARAN K, CAO G, et al. Corrosion of a Stainless Steel and Nickel-based Alloys in Supercritical Carbon Dioxide Environment[J]. Corrosion Science, 2013, 69: 281-29.
- [13] FURUKAWA T, ROUILLARD F. Oxidation and Carburing of FBR Structural Materials in Carbon Dioxide[J]. Progress in Nuclear Energy, 2015, 82: 136-141.
- [14] PINT B A, KEISER J R. Supercritical CO<sub>2</sub> Compatibility of Structural Alloys at 400~750 °C[R]. Oak Ridge, TN (United States): Oak Ridge National Laboratory (ORNL), 2016.
- [15] PFENNIG A, BÄBLER R. Effect of CO<sub>2</sub> on the Stability of Steels with 1% and 13% Cr in Saline Water[J]. Corrosion Science, 2009, 51(4): 931-940.
- [16] YEVTSHENKO O, BÄBLER R, PFENNIG A. Corrosion Behaviour of Cr13 Steel in CO<sub>2</sub> Saturated Brine with High Chloride Concentration[J]. Materials and Corrosion, 2012, 63(6): 517-521.
- [17] NEŠIĆ S, LEE K L J. A Mechanistic Model for Carbon Dioxide Corrosion of Mild Steel in the Presence of Protective Iron Carbonate Films—Part 3: Film Growth Model[J]. Corrosion, 2003, 59(7): 616-628.
- [18] 赵双群, 谢锡善. Ni-Cr-Co基高温合金在含水蒸气的空气中的高温腐蚀行为[J]. 北京科技大学学报, 2004, 26(3): 289-292.  
ZHAO Shuang-qun, XIE Xi-shan. High Temperature Corrosion Behavior of Ni-Cr-Co Base Superalloy in Air with Water Vapor[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2004, 26(3): 289-292.
- [19] FUJII C T, MEUSSNER R A. The Mechanism of the High-Temperature Oxidation of Iron Chromium Alloys in Water Vapor[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1964, 111(11): 1215-1221.

- [20] FUJII C T, MEUSSNER R A. Oxide Structures Produced on Iron Chromium Alloys by a Dissociative Mechanism[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1964, 110(12): 1195-1204.
- [21] JOHANNESEN D, ANDERSON A. Selected Topics in High Temperature Chemistry: Defect Chemistry of Solids[M]. Holland: Elsevier Science Ltd, 1990: 101.
- [22] SHEN Jia-nian, ZHOU Long-jiang, LI Tie-fan. High-temperature Oxidation of Fe-Cr Alloys in Wet Oxygen[J]. *Oxidation of Metals*, 1997, 48: 347-356.
- [23] FRITSCHER K, LEE Y T. Effect of Water Vapor on Oxidation and Creep Behavior of Incoloy 800 at Temperatures between 850 and 980 °C[J]. *Oxidation of Metals*, 1989, 32: 296-316.
- [24] ASTEMAN H, SVENNNSON J E, Johansson L G, et al. Indication of Chromium Oxide Hydroxide Evaporation During Oxidation of 304L at 873 K in the Presence of 10% Water Vapor[J]. *Oxidation of Metals*, 1999, 52: 95-111.
- [25] CHIO C H, SHARMA S K, MUENOW D W. The Hydrates and Deuterates of Ferrous Sulfate ( $\text{FeSO}_4$ ): A Raman Spectroscopic Study[J]. *Journal of Raman Spectroscopy*, 2007, 38(1): 87-99.
- [26] XIANG Y, WANG Z, XU C, et al. Impact of  $\text{SO}_2$  Concentration on the Corrosion Rate of X70 Steel and Iron in Water-saturated Supercritical  $\text{CO}_2$  Mixed with  $\text{SO}_2$ [J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2011, 58(2): 286-294.
- [27] PINT B A, KEISER J R. The Effect of  $\text{O}_2$  and  $\text{H}_2\text{O}$  on oxidation in  $\text{CO}_2$  at 700~800 °C[R]. Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory, 2016.
- [28] SARRADE S, FÉRON D, ROUILLARD F, et al. Overview on Corrosion in Supercritical Fluids[J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2017, 120: 335-344.
- [29] FIROUZDOR V, CAO G P, SRIDHARAN K, et al. Corrosion Resistance of PM2000 ODS Steel in High Temperature Supercritical Carbon Dioxide[J]. *Materials and Corrosion*, 2015, 66(2): 137-142.
- [30] HOLCOMB G R, CARNEY C, DOĞAN Ö N. Oxidation of Alloys for Energy Applications in Supercritical  $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2\text{O}$ [J]. *Corrosion Science*, 2016, 109: 22-35.
- [31] HE L, ROMAN P, LENG B, et al. Corrosion Behavior of an Alumina Forming Austenitic Steel Exposed to Supercritical Carbon Dioxide [J]. *Corrosion Science*, 2014, 82(2): 67-76.
- [32] NGUYEN T D, ZHANG J, YOUNG D J. Effects of Silicon and Water Vapour on Corrosion of Fe-20Cr and Fe-20Cr-20Ni Alloys in  $\text{CO}_2$  at 650 °C[J]. *Oxidation of Metals*, 2017, 87: 541-573.
- [33] NGUYEN T D, ZHANG J, YOUNG D J. Effect of Mn on Oxide Formation by Fe-Cr and Fe-Cr-Ni Alloys in Dry and Wet  $\text{CO}_2$  Gases at 650 °C[J]. *Corrosion Science*, 2016, 112: 110-127.
- [34] NGUYEN TD, PENG X, ZHANG J, et al. Corrosion Resistance of Chromised and Aluminised Coatings in Wet  $\text{CO}_2$  Gas at 650 °C[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 316: 226-238.
- [35] NEWCOMB S B, STOBBS W M. The Initiation of Breakaway Oxidation of Fe-9Cr-1Mo in a High Pressure  $\text{CO}_2$  Atmosphere[J]. *Oxidation of Metals*, 1986, 26(5-6): 431-466.
- [36] ROUILLARD F, MOINE G, TABARANT M, et al. Corrosion of 9Cr Steel in  $\text{CO}_2$  at Intermediate Temperature II: Mechanism of Carburization[J]. *Oxidation of Metals*, 2012, 77(1-2): 57-70.
- [37] CAO G, FIROUZDOR V, SRIDHARAN K, et al. Corrosion of Austenitic Alloys in High Temperature Supercritical Carbon Dioxide[J]. *Corrosion Science*, 2012, 60: 246-255.
- [38] LIANG Z Y, YU M, GUI Y, et al. High Temperature Corrosion of Heat-resistant Materials in Carbon Dioxide Environment[J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2017, 30(3): 237-243.
- [39] LIANG Z, YU M, GUI Y, et al. Corrosion Behavior of Heat-Resistant Materials in High-Temperature Carbon Dioxide Environment[J]. *JOM*, 2018, 70(8): 1464-1470.
- [40] LIANG Z, GUI Y, ZHAO Q. High-temperature Corrosion Behavior of Three Heat-resistant Steels Under Supercritical Dioxide Condition [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2019, 53(7): 23-29.
- [41] LIANG Z, GUI Y, WANG Y, et al. Corrosion Performance of Heat-resisting Steels and Alloys in Supercritical Carbon Dioxide at 650 °C and 15 MPa [J]. *Energy*, 2019, 175: 345-352.
- [42] LI Y, LIANG Z, DENG S, et al. Corrosion Behavior of Heat Resistant Alloys HR6W and 740H in High-Temperature Carbon Dioxide Environment[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(5): 179-188.
- [43] GONG Y, YOUNG D J, KONTIS P, et al. On the breakaway oxidation of Fe9Cr1Mo steel in high pressure  $\text{CO}_2$ [J]. *Acta Materialia*, 2017, 130: 361-374.
- [44] YOUNG D J, ZHANG J. Alloy Corrosion by Hot  $\text{CO}_2$  Gases[J]. *JOM*, 2018, 70(8): 1493-1501.
- [45] VISWANATHAN R, SARVER J, TANZOSH J M. Boiler Materials for Ultra-supercritical Coal Power Plants—Steamside Oxidation[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2006, 15(3): 255-274.
- [46] NI Z, WANG X, WANG J, et al. Characterization of the Phase Transformation in a Nano Structured Surface Layer of 304 Stainless Steel Induced by High-energy Shot Peening[J]. *Physica B Condensed Matter*, 2003, 334(1-2): 221-228.
- [47] LI X G, HE J W. Effect of Shot Blasting on Oxidation Behavior of TP304H Steel at 610~770 °C in Water Vapor[J]. *Materials Letters*, 2006, 60(3): 339-344.
- [48] LU Jin-tao, ZHAO Xin-bao, YUAN Yong, et al. Corrosion Behavior of Alloys in Supercritical  $\text{CO}_2$  Brayton Cycle Power Generation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(3): 739-745.