

高温 CO₂ 环境下耐热合金 HR6W 和 740H 的腐蚀行为

李玉峰, 梁志远, 邓世丰, 桂雍, 邵怀爽, 赵钦新

(西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了研究高温 CO₂ 环境下耐热合金 HR6W 和 740H 的腐蚀行为,开展了 800、900、1 000 °C CO₂ 环境下的耐热合金腐蚀实验,并进行了腐蚀产物的微观表征。利用分析天平获取耐热合金腐蚀前后的质量变化,并计算其激活能;应用激光拉曼光谱仪和 X 射线衍射仪对合金表面腐蚀产物进行表征分析;利用扫描电子显微镜等设备观察样品的微观形貌,并分析腐蚀产物成分与分布。实验结果表明:两种耐热合金在高温 CO₂ 环境下的腐蚀动力曲线符合抛物线规律,HR6W 和 740H 的激活能分别为 -256.59、-293.35 kJ/mol;HR6W 表面氧化产物为致密均匀的 Cr₂O₃ 氧化层和 MnCr₂O₄ 氧化层;740H 存在内氧化现象,外层氧化产物为 TiO₂ 氧化层和 Cr₂O₃ 氧化层,内层氧化产物为非均匀的 Al₂O₃ 及 TiO₂ 氧化物;两种合金均无明显碳化现象;对比腐蚀增质和氧化层厚度发现,HR6W 的耐腐蚀性能优于 740H 的,这是由于 740H 中 Ti 元素的外扩散破坏了 Cr₂O₃ 和 Ti、Al 元素的内氧化行为而造成的。

关键词: 耐热合金;二氧化碳;腐蚀行为

中图分类号: TG178 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202005023 **文章编号:** 0253-987X(2020)05-0179-10



OSID 码

Corrosion Behavior of Heat Resistant Alloys HR6W and 740H in High-Temperature Carbon Dioxide Environment

LI Yufeng, LIANG Zhiyuan, DENG Shifeng, GUI Yong, SHAO Huaishuang, ZHAO Qinxin

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

Abstract: The corrosion behaviors of heat-resistant alloys HR6W and 740H in carbon dioxide at 800, 900, 1 000 °C were investigated. The weight gain of the alloys was obtained by the analytical balance and the activation energy was evaluated. Raman spectrometer and X-ray diffraction were used to characterize the surface of the alloys. Scanning electron microscope and other equipment were used to observe the micro-surface morphology of the alloys. The results show that the corrosion kinetics of the alloys obeys a parabolic law. The activation energy of HR6W and 740H gets -256.59 kJ/mol and -293.35 kJ/mol, respectively. Dense oxide films of Cr₂O₃ and MnCr₂O₄ are formed on the surface of HR6W. In addition to the surface oxide films of TiO₂ and Cr₂O₃, internal oxidation occurs on the surface of 740H. The outer layers consist of Cr₂O₃ and TiO₂, the internal corrosion products are non-uniform Al₂O₃ and TiO₂. In the high-temperature CO₂ atmosphere, no carbonization is observed in the alloys. Analyzing the results of mass change

收稿日期: 2019-12-13。 作者简介: 李玉峰(1995—),男,硕士生;梁志远(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51808166);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2019JQ-604);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(Z201806052)。

网络出版时间: 2020-02-17

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20200214.1659.004.html>

and oxide layer thickness, it is found that the corrosion resistance of HR6W is better than that of 740H, which is attributed to the outward diffusion of Ti through Cr_2O_3 weakening the internal oxidation of Ti and Al.

Keywords: heat-resistant alloy; carbon dioxide; corrosion behavior

随着我国节能减排政策的日益严格,新型电力循环系统和技术应运而生,如超临界 CO_2 循环系统和富氧燃烧技术。超临界 CO_2 循环使用 CO_2 代替水蒸气工质,大幅度提高了电厂能效,缩小了涡轮机械和换热器的结构尺寸,降低了运行的维护成本。超临界 CO_2 系统适用于燃煤热电厂、核能、太阳能、地热能及余热回收等领域^[1-4]。富氧燃烧技术指燃料在纯氧中燃烧,燃烧后会产生大量的 CO_2 ,通过烟气再循环技术可控制炉内温度,这种技术不仅有利于改善环境,还有利于 CO_2 的捕集利用^[5-6]。富氧燃烧系统中产生的 CO_2 要远高于空气燃烧产生的 CO_2 。由于文献^[1-6]的新型系统和技术均引进了 CO_2 ,因此研究关键高温部件材料在 CO_2 环境下的腐蚀行为势在必行。

镍基合金具有高蠕变强度及耐高温腐蚀性能,因此在新型电力系统及其技术应用中前景广阔^[4,7]。钢在 CO_2 环境下的高温腐蚀行为研究可以追溯到 20 世纪 60 年代,主要研究内容为钢在气冷核反应堆中的氧化腐蚀,其中 CO_2 为主要的冷却剂^[7-8],但限于制造水平,超临界 CO_2 系统研究进展缓慢。近年来,随着制造水平的提升,超临界 CO_2 系统的研究逐渐火热,国内外学者对于纯 CO_2 中钢的氧化行为进行了新的讨论^[7-11]。在高温 CO_2 环境下,合金表面形成的 Cr_2O_3 保护层非常薄,未观察到明显渗碳现象^[9,12-13]。随着温度的升高,形成 Cr_2O_3 保护层所需要的 Cr 含量降低^[9,12-13]。Nguyen 等发现,在合金中添加少量的 Si、Al、Ti 元素可以促进 Cr_2O_3 保护层的形成^[10]。在 O_2 杂质质量分数为 $10\times10^{-6}\sim100\times10^{-6}$ 的 CO_2 环境中,HR230 表面氧化物发生剥落^[9]。 O_2 杂质对耐热材料的腐蚀性能无影响^[11]。在空气和水蒸气环境下,740H 表面氧化物未发生明显变化,均存在内氧化现象^[14-16]。

由于高温 CO_2 环境下耐热合金 HR6W 和 740H

的腐蚀行为及产物演变规律未见报道,所以本文对此进行了实验研究。

1 实验系统及方法

高温 CO_2 腐蚀实验系统如图 1 所示。该实验系统主要包括水平管式加热炉及尾气处理装置。实验采用的 CO_2 为工业高纯度 CO_2 (质量分数 99.999%),体积流量为 100 mL/min。实验材料选择强度高、抗腐蚀性能优越的耐热合金 HR6W 和 740H,两种材料均为 700℃ 先进超超临界电站锅炉高温部件的候选材料,合金成分见表 1。实验温度为 800、900、1 000℃。

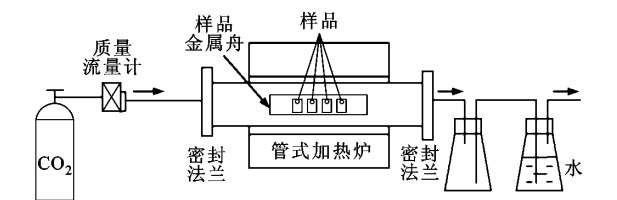


图 1 实验系统示意图

实验样品的尺寸为 15 mm×15 mm×3 mm,样品中上部边缘处开有 $\Phi2$ mm 的圆孔,方便悬挂于样品金属舟上,保证样品与气流充分接触。实验开始前,使用 240 号、400 号、800 号、1000 号 SiC 砂纸依次打磨样品,随后将样品置于酒精溶液中进行超声波清洗 5 min,低温晾干后将样品置于样品金属舟上进行实验。实验采取不连续称量法,在冷却 25、50、75、100 h 后,分别使用分析天平称量合金,绘制腐蚀动力曲线并计算激活能。对样品进行激光拉曼光谱分析和 X 射线衍射分析(XRD)以获取表面的腐蚀产物及其物相组分,使用扫描电子显微镜(SEM)结合能量光谱(EDS)分析样品表面和截面的形貌和成分,从而得到耐热合金 HR6W 和 740H 的腐蚀行为及产物演变规律。

表 1 实验材料的主要成分

材料	质量分数/%							其他元素
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe	Ti	
HR6W	0.100	1.000	1.500	24.500	40.885	25.000	0.150	W:6.550;P:0.300;S:0.015
740H	0.028	0.030	0.020	24.730	50.212	0.120	1.310	Al:1.530;Mo:0.300;Cu:0.020;Co:20.300;Nb:1.400

2 实验结果

2.1 腐蚀动力曲线

图 2 显示了在 800、900、1 000 °C 的 CO₂ 环境中,反应 100 h 内耐热合金 HR6W 和 740H 的质量变化情况。分析可知:740H 的质量增加量高于 HR6W 的;两种高温合金的腐蚀增质随着时间的增加而缓慢增大。经拟合后发现,HR6W 和 740H 的腐蚀动力曲线符合抛物线规律,可套用 Wanger 提出的抛物线定律^[17-21],即

$$(\Delta W/A)^2 = K_T t \tag{1}$$

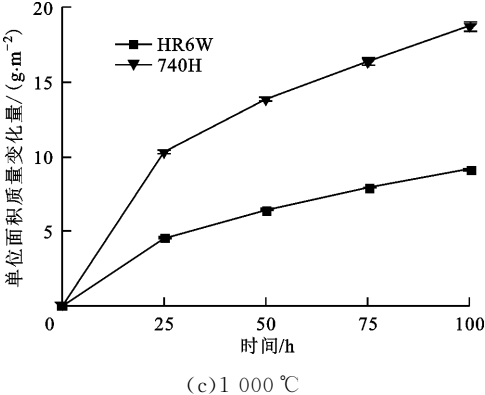
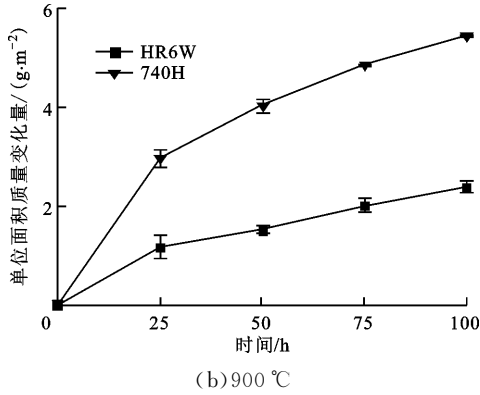
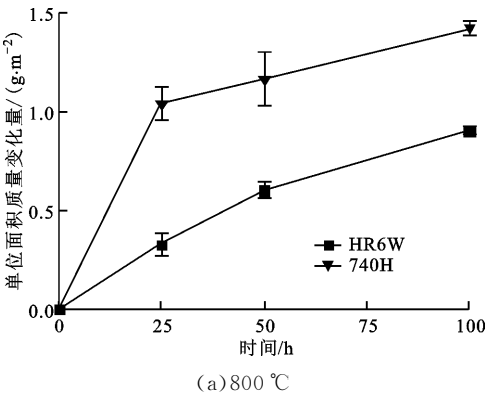


图 2 800、900、1 000 °C 的 CO₂ 环境中 HR6W 和 740H 的腐蚀增质曲线

式中: ΔW 为质量变化量; K_T 为抛物线速率常数; A 为试样表面积; t 为实验测试时间。

根据式(1)及图 2 计算出耐热合金 HR6W 与 740H 在高温 CO₂ 环境下的抛物线速率常数,结果如表 2 所示。可以看出,在相同温度下,两种合金的抛物线速率常数在同一数量级范围内,且 740H 的抛物线速率常数是 HR6W 的 2.5~5.0 倍,随着温度的变化,两种合金的抛物线速率常数变化较大,表明在高温 CO₂ 环境下两种合金的腐蚀行为受温度影响较大。

表 2 CO₂ 环境下耐热合金 HR6W 和 740H 的抛物线氧化速率常数

温度/°C	抛物线速率常数/(g ² ·cm ⁻⁴ ·s ⁻¹)	
	HR6W	740H
800	2.27×10 ⁻¹⁴	5.58×10 ⁻¹⁴
900	1.58×10 ⁻¹³	8.20×10 ⁻¹³
1 000	2.33×10 ⁻¹²	9.84×10 ⁻¹²

通常,抛物线速率常数^[17-24]表示为

$$K_T = A_1 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \tag{2}$$

式中: A_1 为常数; Q 为材料激活能; R 为摩尔气体常数; T 为反应温度。对式(2)进行变化^[22-23],得到

$$\ln K_T = \ln K_0 + \left(-\frac{Q}{R}\right) \frac{1}{T} \tag{3}$$

式中 K_0 为常数。

结合式(3)和表 2,由线性拟合可得出基于质量增加量的阿累尼乌斯图,如图 3 所示,分析可知,耐热合金 HR6W 与 740H 在 CO₂ 环境下的激活能分别为-256.59、-293.35 kJ/mol。

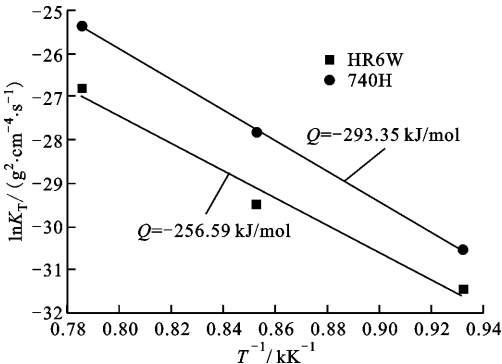


图 3 基于质量增加量的阿累尼乌斯图

2.2 激光拉曼光谱分析和 X 射线衍射分析

为了确定样品表面腐蚀产物及物相成分,对样品进行拉曼分析和 XRD 分析,结果如图 4 和图 5 所示。图 4 为在 1 000 °C 的 CO₂ 环境下,反应 100 h

后耐热合金 HR6W 和 740H 的拉曼图谱。与标准图谱对比分析可知,HR6W 表面氧化物主要为 Cr_2O_3 ,740H 表面氧化物主要为 Cr_2O_3 和 TiO_2 。

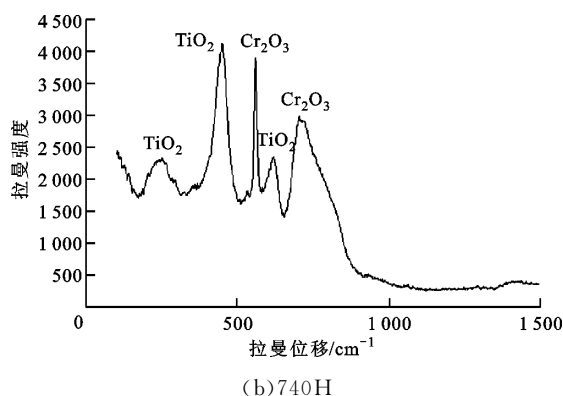
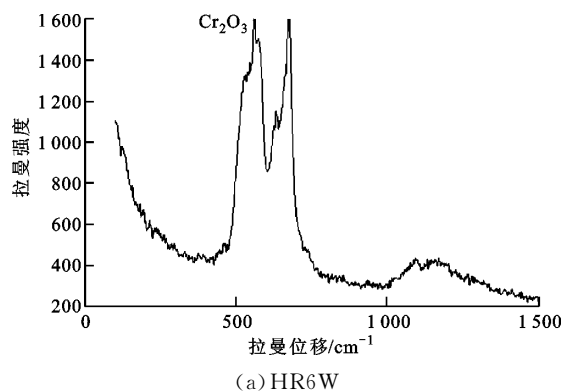


图4 1 000 °C 的 CO_2 环境下反应 100 h 后 HR6W 和 740H 的拉曼图谱

图5为在800、900、1 000 °C 的 CO_2 环境下,反应100 h后耐热合金 HR6W 和 740H 的 XRD 图谱。可以看出:在800 °C下,HR6W 和 740H 表面氧化物主要为 Cr_2O_3 ;在900 °C 和 1 000 °C 下,耐热合

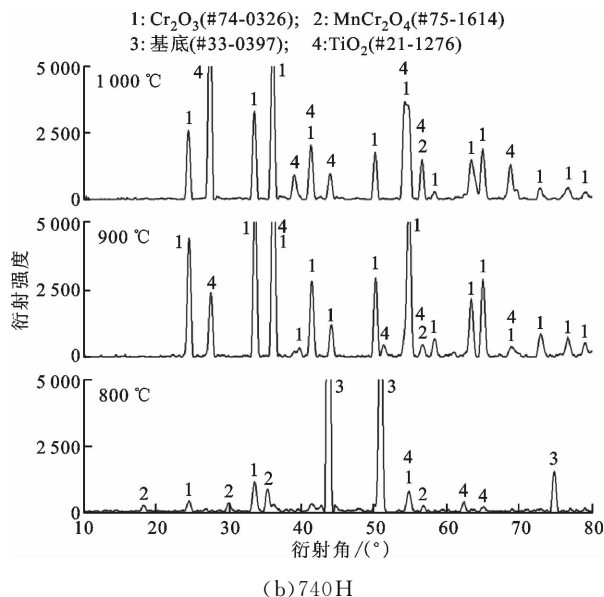
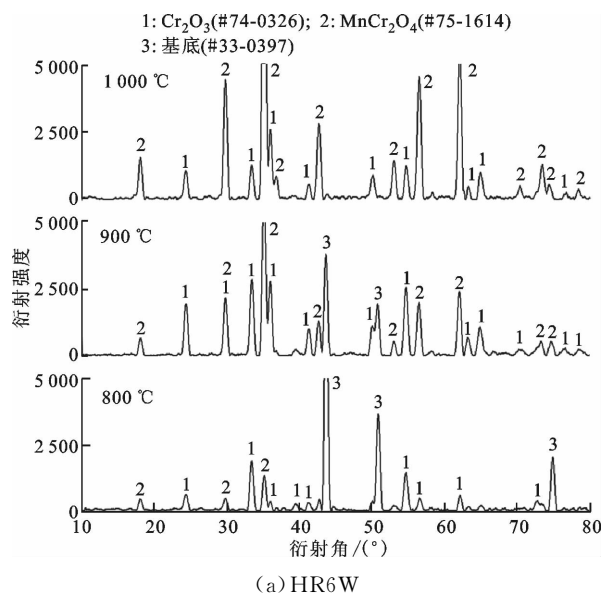


图5 800、900、1 000 °C 的 CO_2 环境下反应 100 h 后 HR6W 和 740H 的 XRD 图谱

金的腐蚀产物发生了变化,HR6W 表面氧化物主要变为 Cr_2O_3 和 MnCr_2O_4 ,而 740H 表面氧化物变为 TiO_2 和 Cr_2O_3 。此外,在800 °C下,HR6W 和 740H 出现了基体相的强峰,这是由于该温度下样品表面形成的氧化层非常薄而导致的。从耐热合金 HR6W 和 740H 的拉曼分析和 XRD 分析可知,在高温 CO_2 环境下,合金表面腐蚀产物主要成分为 Cr_2O_3 ,这是因为高温下 Cr 元素与 O 元素的亲和力要大于 Fe 元素的,且在两种合金中均有足够的 Cr 元素含量(质量分数大于 20%)以供合金表面生成致密均匀的 Cr_2O_3 保护层。

2.3 形貌分析

图6为在800、900、1 000 °C 的 CO_2 环境下,反应100 h后耐热合金 HR6W 和 740H 的宏观形貌。可以看出,耐热合金 HR6W 和 740H 反应 100 h

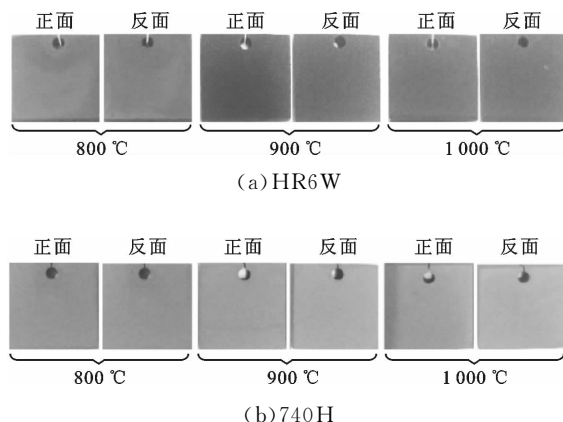


图6 800、900、1 000 °C 的 CO_2 环境下反应 100 h 后 HR6W 和 740H 的宏观形貌

后,样品表面光滑,除样品表面颜色加深外,无较为明显的变化。

2.3.1 HR6W 的微观形貌分析 图 7 为在 800、900、1 000 ℃ 的 CO₂ 环境下,反应 100 h 后 HR6W 的表面微观形貌。可以看出,温度的变化对耐热合金 HR6W 样品表面形貌影响较大,具体表现为,随

着温度的升高,表面氧化物愈加明显,且出现结节现象,但未观察到氧化物的剥落。由图 4 的拉曼分析结果和图 5 的 XRD 分析结果可知,HR6W 表面氧化物由 Cr₂O₃ 变为 Cr₂O₃ 和 MnCr₂O₄。

图 8 和图 9 分别是 1 000 ℃ 的 CO₂ 环境下,反应 100 h 后 HR6W 的断面能谱面扫描和线扫描结果,

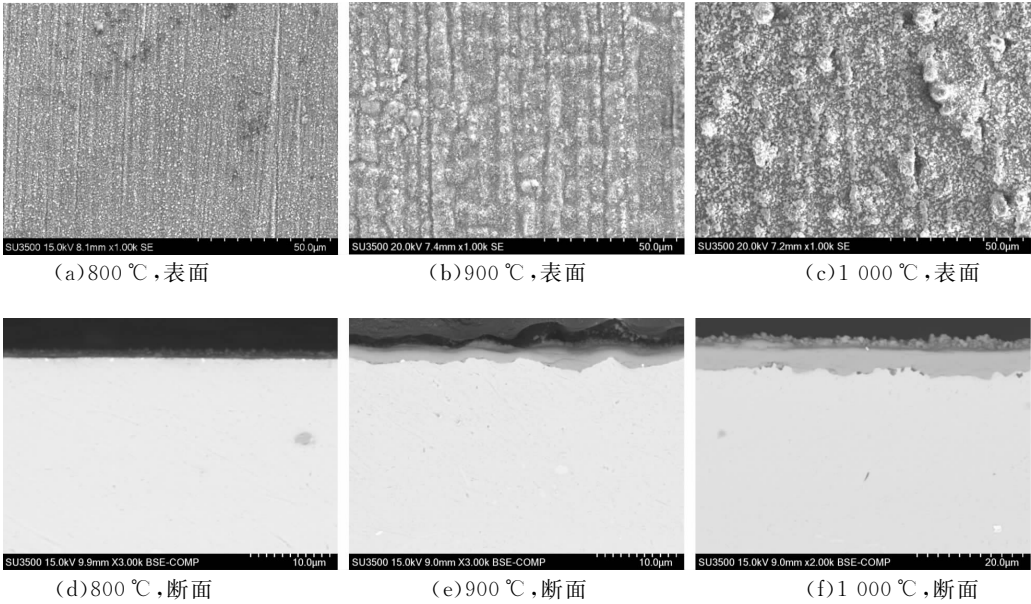


图 7 800、900、1 000 ℃ 的 CO₂ 环境下反应 100 h 后 HR6W 表面及断面微观形貌

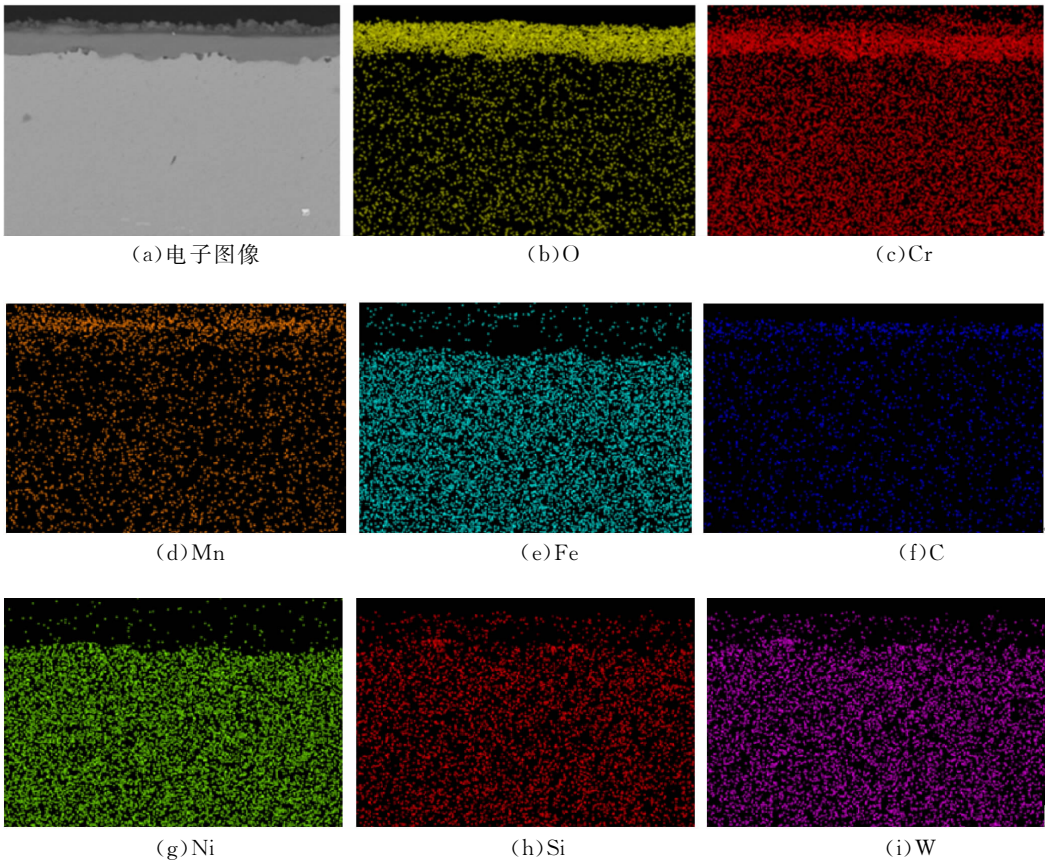
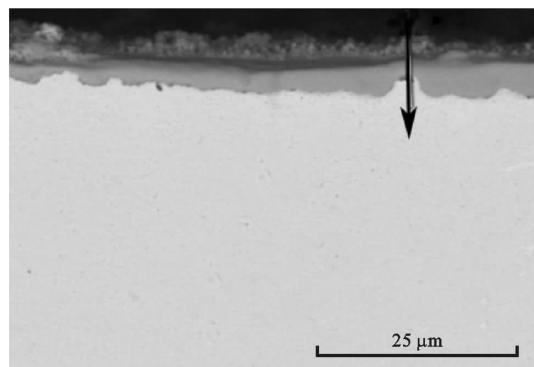
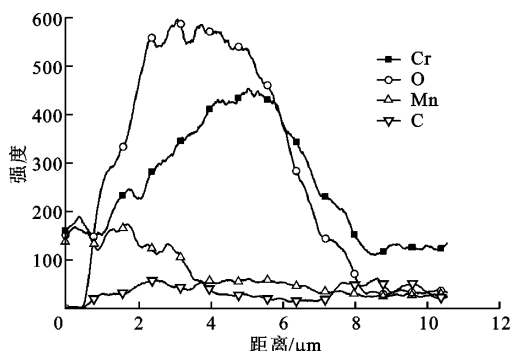


图 8 1 000 ℃ 的 CO₂ 环境下反应 100 h 后 HR6W 的断面能谱面扫描结果



(a)电子图像



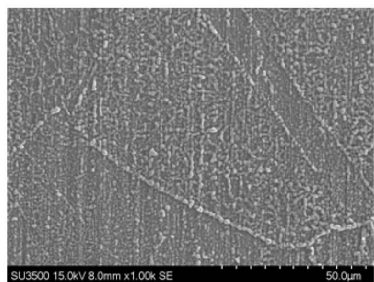
(b)线能谱分析

图9 1 000 °C的CO₂环境下反应100 h后HR6W的断面能谱线扫描结果

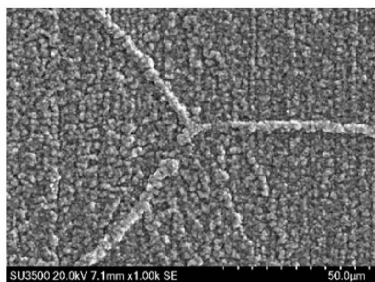
图9a中箭头尾部位置表示图9b中距离为0处,箭头方向为表示距离增大方向。分析可知,随着温度的升高,HR6W表面生成的致密均匀的氧化层变厚。

EDS分析结果表明,HR6W表面腐蚀产物主要含有Cr、Mn、O及少量的Si元素。此外,从图8还可以看出,HR6W在900 °C和1 000 °C的CO₂环境下反应100 h后形成的氧化层较为致密均匀,且致密均匀的氧化层区域主要富集Cr和O元素,Cr元素上方存在Mn元素的富集,下方出现贫Cr区。

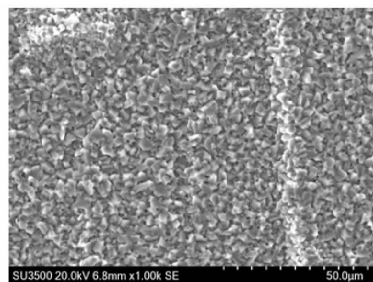
2.3.2 740H的微观形貌分析 图10为在800、900、1 000 °C的CO₂环境下,反应100 h后740H的表面及断面微观形貌。可以看出,随着温度的升高,740H表面腐蚀产物尺寸逐渐变大,且其表面晶界增长速度加快,晶界较为明显。由EDS分析结果可知,沿晶界腐蚀产物主要是TiO₂。由拉曼分析和XRD分析结果可知,随着温度的升高,740H表面氧化物由Cr₂O₃变为TiO₂和Cr₂O₃。由图10还可以看出,740H与HR6W相同,合金表面腐蚀层厚度随着温度的增加而增加,不同的是,在740H表面出现内氧化现象,由EDS分析可知,外层为含有Ti元素的致密均匀的Cr₂O₃氧化层,内层为非均匀的Al₂O₃和TiO₂氧化物。对1 000 °C的CO₂环境下,反应100 h后的740H展开分析。由EDS分析可知,740H表面腐蚀产物主要含有Cr、Mn、Al、O、Ti及少量的Si元素,其中外部氧化层主要由Cr、Mn、Ti、O元素组成,内部氧化层主要由Al、Ti和O元素组成。图11和图12分别是740H的断面能谱面扫描和线扫描结果,图12a中箭头尾部位置表示图12b中距离为0处,箭头方向表示距离增大方向。分



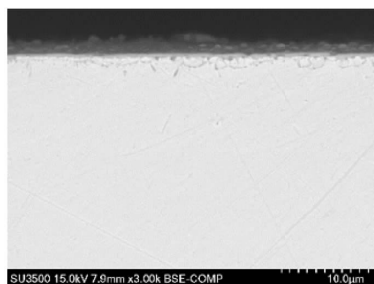
(a)800 °C,表面



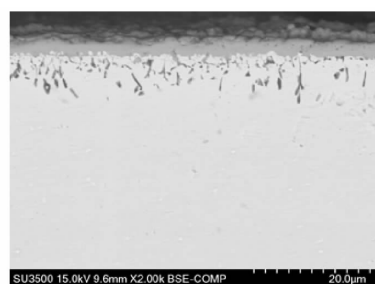
(b)900 °C,表面



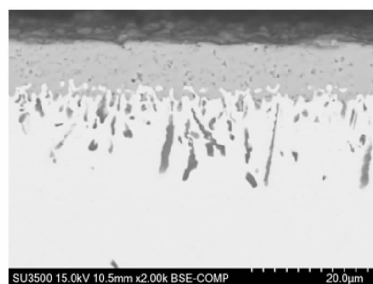
(c)1 000 °C,表面



(d)800 °C,断面



(e)900 °C,断面



(f)1 000 °C,断面

图10 800、900、1 000 °C的CO₂环境下反应100 h后740H表面及断面微观形貌

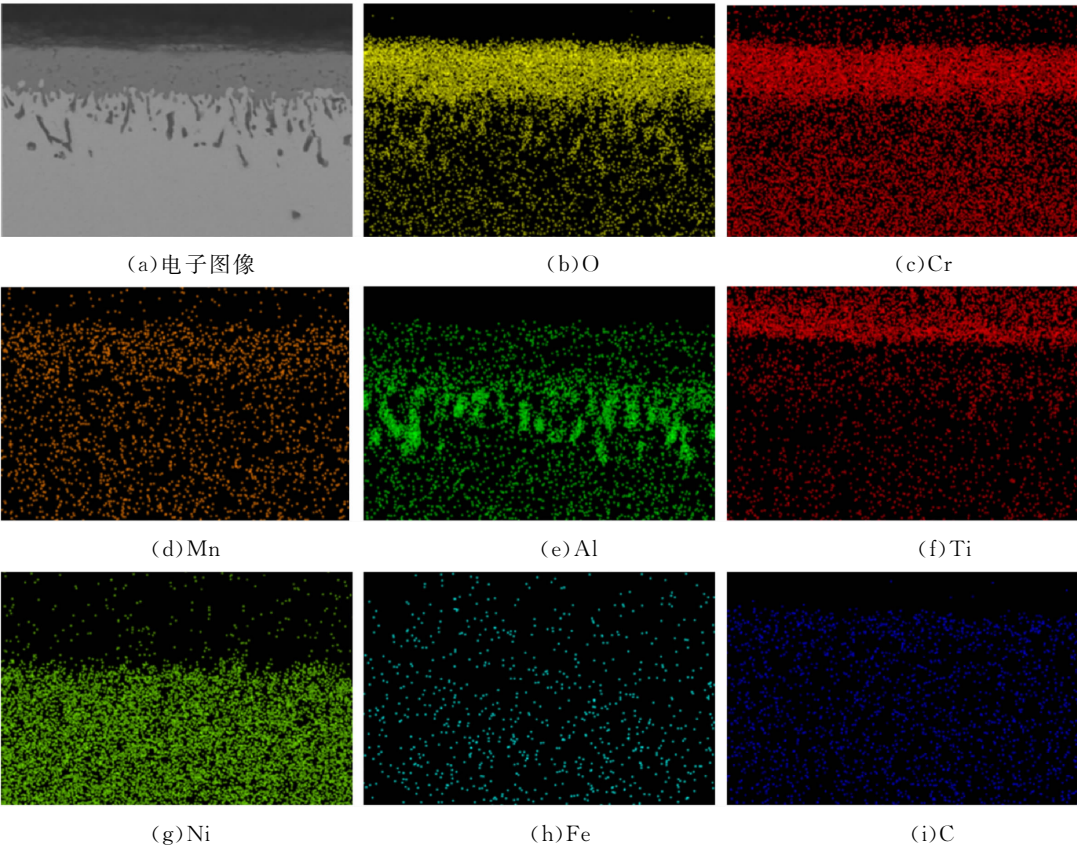
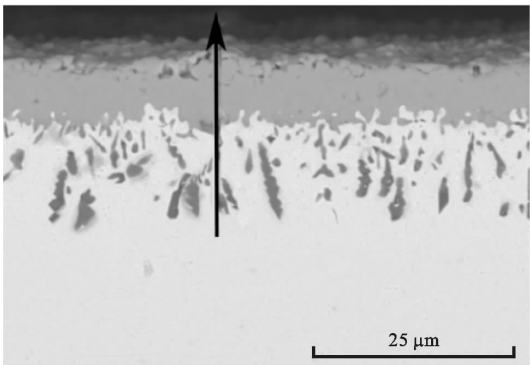
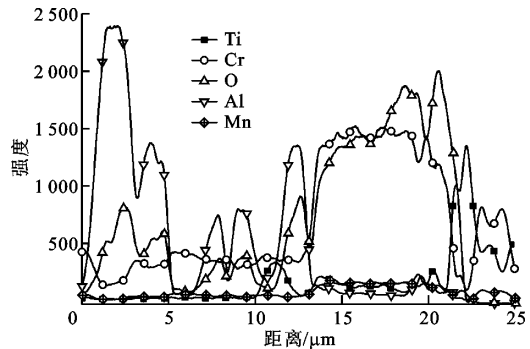


图 11 1 000 °C 的 CO₂ 环境下反应 100 h 后 740H 的断面能谱面扫描结果



(a) 电子图像



(b) 线扫描能谱

图 12 1 000 °C 的 CO₂ 环境下反应 100 h 后 740H 的断面能谱线扫描结果

析可知,740H 在 1 000 °C 的 CO₂ 环境下反应 100 h 后形成的外氧化层较为致密,致密均匀的氧化层区域主要富集 Cr、O 以及 Ti 元素,内氧化产物主要是 Al 元素的氧化物。

3 讨论分析

3.1 腐蚀动力曲线

由图 2 和表 2 可以看出,HR6W 和 740H 的腐蚀动力曲线符合抛物线规律,且两种合金的氧化速率受温度影响较大,从拉曼、XRD、EDS 分析结果中可以看出,这是由于温度的升高,合金表面的氧化物组成发生了变化而导致的。由图 4、5、8~12 的拉曼、XRD、EDS 分析结果中可以看出,740H 在 900 °C 和 1 000 °C 的 CO₂ 环境下生成的氧化物主要为 Cr₂O₃ 和 TiO₂,而在 800 °C 的 CO₂ 环境下,除 Cr₂O₃ 和 TiO₂ 外还有 MnCr₂O₄。合金表面氧化物的变化导致了反应物离子的扩散系数发生变化,进而导致了氧化速率发生变化。从拉曼、XRD、EDS 分析结果中还可以看出,在 CO₂ 环境下耐热合金 HR6W 和 740H 表面腐蚀产物主要成分为 Cr₂O₃,这是由于高温下 Cr 元素与 O 元素的亲和度要大于 Fe 元素的,且两种合金均有足够的 Cr 元素含量(质量分

数大于20%),可以促进表面形成 Cr_2O_3 氧化层,所以合金外层并没有发现Fe元素的氧化物。

3.2 腐蚀产物的演变

对耐热合金腐蚀产物进行了热力学理论计算,发现形成腐蚀产物 MnCr_2O_4 和 Cr_2O_3 的吉布斯自由能较低。结合拉曼、XRD、SEM和EDS分析结果,做出了高温 CO_2 环境下两种耐热合金的腐蚀产物演变图,如图13所示。HR6W在高温 CO_2 环境下的腐蚀产物的演变过程为:800℃下,薄的 Cr_2O_3 氧化层→900℃下,致密均匀的 Cr_2O_3 氧化层及氧化层上方的 MnCr_2O_4 氧化层→1000℃下,更厚的

致密均匀的 Cr_2O_3 氧化层及氧化层上方的 MnCr_2O_4 氧化层。740H在高温 CO_2 环境下的腐蚀产物演变过程为:800℃下,薄的 Cr_2O_3 氧化层,内氧化产物为 Al_2O_3 氧化物→900℃下, TiO_2 氧化层及致密均匀的 Cr_2O_3 氧化层,内氧化产物为 Al_2O_3 和 TiO_2 氧化物→1000℃下,更厚的 TiO_2 氧化层及致密均匀的 Cr_2O_3 氧化层,内氧化产物为 Al_2O_3 和 TiO_2 氧化物。高温 CO_2 环境下耐热合金HR6W和740H的腐蚀产物演变过程表明,氧化的腐蚀过程主要是由金属原子的向外扩散和O原子向内扩散控制的^[17-18]。

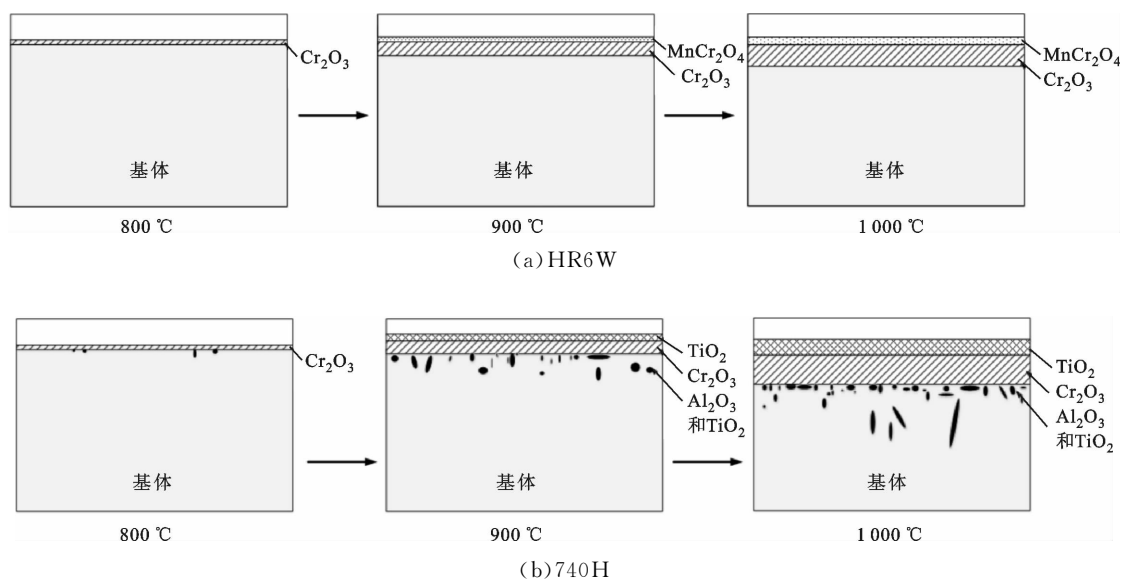


图13 高温 CO_2 环境下耐热合金HR6W和740H腐蚀产物演变模型

在氧化过程中,两种合金中都有足够的Cr元素以形成 Cr_2O_3 氧化层,且随着温度的升高, Cr_2O_3 氧化层也会变厚,在较厚的 Cr_2O_3 氧化层下面存在Cr元素的耗尽区。

HR6W在800℃时,表面生成的 Cr_2O_3 氧化层非常薄,XRD分析结果中出现基体相的强峰。随着温度的升高,HR6W氧化层上方生成 MnCr_2O_4 氧化层,除氧化层厚度变化外,其他无较大变化。

740H在800℃时,XRD分析结果表明其表面生成的 Cr_2O_3 氧化层非常薄,同时出现基体相的强峰,此时几乎没有内氧化现象。温度升高到900℃时,740H表面形成了致密均匀的 Cr_2O_3 氧化层。此外,Ti元素在浓度差的驱动下向外扩散速度加快,因此740H外表面氧化物主要为 TiO_2 及 Cr_2O_3 。740H的内氧化现象较为明显,O原子渗透到基体中,而Al和Ti的含量不足,无法形成连续的保护层,导致了内氧化的发生,内氧化物主要为

Al_2O_3 和 TiO_2 。在温度到达1000℃时,外表面的 TiO_2 氧化层和 Cr_2O_3 氧化层厚度增加,内氧化物仍为 Al_2O_3 和 TiO_2 ,且内氧化现象更加明显。

通常情况下,Cr元素的质量分数高于20%的高温合金在 CO_2 环境下可以形成保护性的 Cr_2O_3 保护层^[19]。在900℃及1000℃的 CO_2 环境下,耐热合金HR6W和740H均形成了致密均匀的 Cr_2O_3 氧化层。

在较高温度下,Al和Ti元素通常是在 Cr_2O_3 层下形成内氧化物 Al_2O_3 和 TiO_2 ^[6,10,16,22,25-26]。同时,Ti元素还会穿过 Cr_2O_3 氧化层至氧化层外侧形成 TiO_2 氧化物,如图11和12所示。Ti元素穿过 Cr_2O_3 氧化层至氧化层外侧形成 TiO_2 氧化层时,破坏了 Cr_2O_3 氧化层的致密结构,加速了O原子的向内扩散,从而形成了更厚的致密均匀的氧化层,如图10f所示。内氧化形成的 Al_2O_3 和 TiO_2 主要分布在晶界处,这主要归因于金属原子的高活性和高

氧分压^[10,25-26]。从图 11 和图 12 可以看出,内氧化形成的 Al₂O₃ 并不均匀,这与该位置的氧分压有关。结合图 8、9、11、12 分析可知,在高温 CO₂ 环境下,耐热合金 HR6W 和 740H 表面几乎没有渗碳现象,仅在氧化物外层检测出 C 元素。

4 结 论

(1)在高温 CO₂ 环境下,耐热合金 HR6W 和 740H 的腐蚀动力曲线遵循抛物线规律。HR6W 和 740H 的激活能分别为-256.59、-293.35 kJ/mol。温度对两种合金的腐蚀行为影响较大。

(2)耐热合金 HR6W 和 740H 表征物相分析表明:HR6W 的表面腐蚀产物主要为 Cr₂O₃ 和 Mn-Cr₂O₄ 氧化层;740H 的表面腐蚀产物主要为 Cr₂O₃ 和 TiO₂ 氧化层。740H 发生内氧化行为,内氧化产物为非均匀的 Al₂O₃ 和 TiO₂ 氧化物,证明在 800~1 000 °C 的 CO₂ 环境下,这两种耐热合金发生的主要是氧化反应。

(3)结合腐蚀增质数据和微观表征结果可知,在 800~1 000 °C 的 CO₂ 环境下,耐热合金 HR6W 的抗腐蚀性能优于 740H 的,这是由于 740H 中 Ti 元素的外扩散破坏了 Cr₂O₃ 和 Ti、Al 元素的内氧化行为而造成的。

参考文献:

- [1] 梁志远,于淼,桂雍,等. 高温 CO₂ 环境中耐热合金腐蚀行为研究 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2018, 30(3): 237-243.
- [2] 鲁金涛,赵新宝,袁勇,等. 超临界二氧化碳布雷顿循环系统中材料的腐蚀行为 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 739-745.
- [3] 梁志远,桂雍,赵钦新. 超临界二氧化碳条件下 3 种典型耐热钢腐蚀特性实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(7): 23-29.
- [4] ALLAM R, MARTIN S, FORREST B, et al. Demonstration of the Allam cycle: an update on the development status of a high efficiency supercritical carbon dioxide power process employing full carbon capture [J]. Energy Proceedia, 2017, 114: 5948-5966.
- [5] BUHRE B J P, ELLIOTT L K, SHENG C D, et al. Oxy-fuel combustion technology for coal-fired power generation [J]. Progress in Energy Combust, 2005, 31(4): 283-307.
- [6] BORDENET B. Influence of novel cycle concepts on the high-temperature corrosion of power plants [J]. Materials and Corrosion, 2008, 59(5): 361-366.
- [7] MARTIN W R, WEIR J R. Influence of chromium content on carburization of chromium-nickel iron alloys in carbon dioxide [J]. Journal of Nuclear Materials, 1965, 16(1): 19-24.
- [8] MCCOY H E. Type 304 stainless steel vs flowing CO₂ at atmospheric pressure and 1100-1800F [J]. Corrosion, 1965, 21(3): 84-94.
- [9] NGUYEN T D, XIE Y, DING S, et al. Oxidation behavior of Ni-Cr alloys in CO₂ at 700 °C [J]. Oxidation of Metals, 2017, 87(5/6): 605-616.
- [10] NGUYEN T D, ZHANG J, YOUNG D J. Effects of Si, Al and Ti on corrosion of Ni-20Cr and Ni-30Cr alloys in Ar-20 CO₂ at 700 °C [J]. Corrosion Science, 2018, 130: 161-176.
- [11] PINT B A, BRESE R G, KEISER J R. Effect of pressure on supercritical CO₂ compatibility of structural alloys at 750 °C [J]. Materials and Corrosion, 2017, 68(2): 151-158.
- [12] XIE Y, ZHANG J, YOUNG D J, et al. Temperature effect on oxidation behavior of Ni-Cr alloys in CO₂ gas atmosphere [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2017, 164(6): 285-293.
- [13] XIE Y, NGUYEN T D, ZHANG J, et al. Corrosion behaviour of Ni-Cr alloys in wet CO₂ atmosphere at 700 and 800 °C [J]. Corrosion Science, 2019, 146: 28-43.
- [14] JIANG H, DONG J, ZHANG M, et al. Oxidation behavior and mechanism of inconel 740H alloy for advanced ultra-supercritical power plants between 1 050 and 1 170 °C [J]. Oxidation of Metals, 2015, 84(1/2): 61-72.
- [15] 谢奕心,程晓农,徐桂芳,等. 高温合金 Inconel 740H 在空气和水蒸气环境中的氧化行为 [J]. 热加工工艺, 2018, 47(14): 55-59.
- XIE Yixin, CHENG Xiaonong, XU Guifang, et al. Oxidation behavior of high temperature alloy Inconel

- 740H in air and water vapor environment [J]. Hot Working Technology, 2017, 48(14): 55-59.
- [16] 鲁金涛, 杨珍, 徐松乾, 等. Inconel 740H 合金在纯水蒸气环境中的高温氧化行为 [J]. 机械工程材料, 2015, 39(10): 37-41.
- LU Jintao, YANG Zhen, XU Songqian, et al. High temperature oxidation behavior of Inconel alloy 740H in pure steam [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2015, 39(10): 37-41.
- [17] LIANG Zhiyuan, YU Miao, GUI Yong, et al. Corrosion behavior of heat-resistant materials in high-temperature carbon dioxide environment [J]. The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society, 2018, 70(8): 1464-1470.
- [18] LIANG Zhiyuan, GUI Yong, WANG Yungang, 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.
- [19] OLESAK R P, TYLCZAK J H. High temperature oxidation of Ni alloys in CO₂ containing impurities [J]. Corrosion Science, 2019, 157: 20-30.
- [20] 于森, 梁志远, 桂雍, 等. 4 种先进超超临界电站锅炉用高温合金高温腐蚀性能实验研究 [J]. 表面技术, 2018, 47(6): 8-16.
- YU Miao, LIANG Zhiyuan, GUI Yong, et al. Experimental study on high temperature resistance in simulated coal-ash environment of four superalloys for AUSC power plant boilers [J]. Surface Technology, 2018, 47(6): 8-16.
- [21] 伯格斯, 迈尔, 佩蒂特. 金属高温氧化导论: 第 2 版 [M]. 辛丽, 王文, 译. 北京: 高等教育出版社, 2010: 44-63.
- [22] WRIGHT I G, DOOLEY R B. A review of the oxidation behaviour of structural alloys in steam [J]. International Materials Reviews, 2013, 55(3): 129-167.
- [23] CAO Guangming, LIU Xiaojiang, SUN Bin, et al. Morphology of oxide scale and oxidation kinetics of low carbon steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2014, 21(3): 335-341.
- [24] GUI Yong, LIANG Zhiyuan, ZHAO Qinxin, et al. Corrosion and carburization behavior of heat-resistant steels in a high-temperature supercritical carbon dioxide environment [J]. Oxidation of Metals, 2019, 92(1/2): 123-136.
- [25] MAHAFFEY J, ADAM D, BRITTAN A, et al. Corrosion of alloy Haynes 230 in high temperature supercritical carbon dioxide with oxygen impurity additions [J]. Oxidation of Metals, 2016, 86(5/6): 567-580.
- [26] LIANG Zhiyuan, ZHAO Qinxin. High temperature oxidation of Fe-Ni-base alloy HR120 and Ni-base alloy HAYNES 282 in steam [J]. Materials at High Temperatures, 2018, 36(1): 87-96.

[本刊相关文献链接]

- 曹志杰, 马晓波. Mo 部分替代 Ti 对 V₄₀Ti₅₀Fe₁₀ 合金储氢性能的影响. 2019, 53(9): 137-144. [doi:10.7652/xjtuxb201909018]
- 万明佳, 俞浪浪, 易艳良, 等. 淬火方式对高硼合金组织及力学性能的影响. 2019, 53(8): 90-97. [doi:10.7652/xjtuxb201908012]
- 成小乐, 周思君, 符寒光, 等. 置氢改性钛合金扩散连接机理研究. 2019, 53(3): 111-116. [doi:10.7652/xjtuxb201903016]
- 鲁中良, 曹继伟, 冯朋帅, 等. 凝胶注模和反应熔渗 SiC 陶瓷基零件素坯缺陷控制及高温力学性能研究. 2019, 53(2): 63-69. [doi:10.7652/xjtuxb201902009]
- 丁欣恺, 孙琨, 张猛, 等. 利用第一性原理计算方法对 NbMo-TaWV_x 高熵合金的研究. 2018, 52(11): 86-92. [doi:10.7652/xjtuxb201811013]
- 路昭, 余小玲, 张立玉, 等. 锂电池组高温节点空气冷却方案的数值模拟. 2018, 52(7): 25-31. [doi:10.7652/xjtuxb201807004]
- 金波, 李明佳, 徐阳, 等. 双层填充床储热器储热性能实验研究. 2018, 52(7): 80-86. [doi:10.7652/xjtuxb201807012]
- 张俊, 陈卫华, 任树伟, 等. 高温环境下梯度多孔金属纤维的吸声性能及优化设计. 2018, 52(1): 143-150. [doi:10.7652/xjtuxb201801021]
- 徐勇勇, 孙琨, 邹增琪, 等. 选区激光熔化制备 Al_{0.5}CoCrFeNi 高熵合金的工艺参数及组织性能. 2018, 52(1): 151-157. [doi:10.7652/xjtuxb201801022]
- 李沁伦, 王璐凯, 刘银河, 等. 300 MW 一次再热亚临界燃煤发电站系统改进研究. 2018, 52(9): 54-63. [doi:10.7652/xjtuxb201809007]
- 李雪芝, 周建平, 王恪典, 等. GH4169 镍基合金短电弧加工温度场数值模拟. 2018, 52(8): 30-36. [doi:10.7652/xjtuxb201808005]
- 张东亚, 高峰, 王建磊, 等. 仿生含油叠层复合材料的高温摩擦学性能. 2017, 51(5): 69-74. [doi:10.7652/xjtuxb201705011]
- 裴勇, 何雅玲. H 型翅片管换热器烟气低温腐蚀影响因素实验研究. 2017, 51(3): 54-61. [doi:10.7652/xjtuxb201703010]

(编辑 陶晴)