

## 超超临界电站锅炉用耐热钢的水蒸汽氧化行为

张伟<sup>1,2</sup> 白银<sup>1</sup> 包汉生<sup>1</sup> 陈正宗<sup>1</sup> 刘正东<sup>1</sup>

(1 钢铁研究总院,北京 100081; 2 中信金属股份有限公司,北京 100004)

**摘要** 燃煤火力发电站利用高温高压蒸汽为工质进行发电。随着火力发电的水蒸汽参数提高到超超临界,水蒸汽氧化问题变得尤其突出。当前超(超)临界火电站锅炉用耐热钢主要有低合金耐热钢、9% Cr 型马氏体耐热钢和 18Cr-8Ni 型奥氏体耐热钢。综述了上述三类耐热钢的蒸汽氧化行为,着重介绍了动力学规律和氧化皮结构特点以及提高抗蒸汽氧化性能的方法。并对这三类材料使用中会出现的蒸汽氧化问题提出了对策。

**关键词** 锅炉用耐热钢 蒸汽氧化 氧化动力学

## Steam-Oxidation Behavior of Heat Resistant Steels for Ultra-Super Critical Power Station Boiler

Zhang Wei<sup>1,2</sup>, Bai Yin<sup>1</sup>, Bao Hansheng<sup>1</sup>, Chen Zhengzong<sup>1</sup> and Liu Zhengdong<sup>1</sup>

(1 Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081; 2 CITIC Metal Co Ltd, Beijing 100004)

**Abstract** Coal fired power plants use high temperature and high pressure steam to make electricity. With the steam parameter improved to ultra-super critical, the steam oxidation becomes much more serious. Heat resistant steels for coal-fired power plants mainly include low alloy heat resistant steels, 9% Cr martensitic heat resistant steels and 18Cr-8Ni austenitic heat resistant steels. In this paper, the steam-oxidation behavior of the three kinds of heat-resistant steels is reviewed, and the kinetics and the structure characteristics of the oxide scale are introduced. The methods of improving steam oxidation resistance are summarized. The methods for avoiding possible oxidation problems in service exposure of the three kinds of materials are suggested.

**Material Index** Boiler Heat-Resistant Steels, Steam Oxidation, Oxidation Kinetics

发展超超临界火电技术能够有效的提高能源利用效率,减少污染和温室气体排放,是实现节能减排、社会经济可持续发展的必然选择<sup>[1-3]</sup>。

通常金属材料在含水环境下的氧化速率远高于干燥环境,因此蒸汽氧化带来的危害也更加明显<sup>[4-5]</sup>。蒸汽氧化引发的危害主要有三方面,一是由于金属损失或传热效率降低引起的许用应力不足,二是由于大尺寸氧化皮剥落引起的管道堵塞,三是由于氧化皮碎屑引起的汽轮机叶片冲蚀。

### 1 典型的锅炉用钢

超超临界电站锅炉用钢主要应用于锅炉的水冷壁、过热器、再热器、集箱和主蒸汽管道等部件。目前广泛应用的锅炉用耐热钢主要包括三类<sup>[6]</sup>,一是 Cr 含量在 2.25% 左右的低合金耐热钢,二是 Cr 含量在 9% ~ 12% 的高 Cr 马氏体耐热钢,三是含 18% Cr、8% Ni 的 18-8 型奥氏体耐热钢。另外还有一些设计应用于 700 °C 级电站的镍基合金材料,现在尚处于研发实验阶段。表 1 列出了这些材料的主要化学成分。

### 2 低合金钢的蒸汽氧化特征

低合金耐热钢主要是指 Cr 含量在 2.25% 左右的 T22、T23 和 T24 等。由于 Cr 含量较低,低合金钢的使用温度一般不高于 600 °C。

金属材料高温氧化动力学通常遵循幂函数规律,如公式 1 所示,式中 X 为氧化增重或氧化皮厚度, k 为氧化速率常数, t 为氧化时间, n 为时间指数。当 n=1 是,氧化动力学结果是直线规律; n=0.5 时,氧化动力学结果是抛物线规律; n=0.33 时,氧化动力学结果是立方规律; n 更小时,氧化动力学结果近似为对数规律。T24 钢在 550 °C 不同含氧量的超临界水中氧化时,氧化动力学公式时间指数分别为 0.38、0.40 和 0.43<sup>[7]</sup>。T22 钢 550 °C 和 600 °C 的氧化动力学公式的时间指数分别为 0.42 和 0.48<sup>[8]</sup>。当温度逐渐升高时,低合金钢的氧化动力学规律从抛物线型向直线型逐渐转变,其抗氧化能力显著降低<sup>[9]</sup>。

$$X = Kt^n \quad (1)$$

表 1 典型锅炉耐热钢的化学成分/%  
Table 1 Chemical composition of typical heat-resistant steels for boiler/%

类别	钢种	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	Nb	Ni	Cu
低合金钢	T22	0.05~0.15	≤0.5	0.3~0.6	1.9~2.6	0.87~1.13	-	-	-	-	-
	T23	0.04~0.10	≤0.5	0.1~0.6	1.9~2.6	0.05~0.3	1.45~1.75	0.2~0.30	0.02~0.08	-	-
	T24	0.05~0.10	0.15~0.45	0.3~0.7	2.2~2.6	0.90~1.10	-	0.2~0.30	-	-	-
9%Cr 马氏体钢	T/P91	0.08~0.12	0.20~0.50	0.3~0.6	8.0~9.50	0.85~1.05	-	0.18~0.25	0.04~0.09	-	-
	T/P92	0.07~0.13	≤0.50	0.3~0.6	8.5~9.50	0.30~0.60	1.5~2.0	0.15~0.25	0.04~0.09	-	-
18-8 型奥氏体钢	TP347H	0.04~0.10	≤0.75	≤2.0	17~20	-	-	-	-	9~13	-
	S30432	0.07~0.13	≤0.30	≤1.0	17~19	-	2.5~3.5Cu	-	0.3~0.6	7.5~10.5	2.3~3.5

低合金钢蒸汽氧化生成的氧化皮形貌如图 1 所示<sup>[8-9]</sup>,氧化皮通常呈明显的分层现象。氧化皮外层通常是由  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的富铁层,当蒸汽中氧分压较高时还会生成  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  层,外层中常含有大量的孔洞等缺陷。氧化皮内层由  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  或  $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{FeCr}_2\text{O}_4$  组成,组织相对致密。由于内层中含 Cr,通常认为氧化皮内层的保护性强于氧化皮外层。当氧化温度高于 570 °C 时,氧化皮/金属界面还会形成 FeO 相。FeO 相是金属不足型半导体,其缺陷密度高,元素在 FeO 中的扩散速率大于在  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  中的扩散速率。因此当氧化皮中大量产生 FeO 相时,材料的抗氧化性能会显著降低。氧化皮外层是由 Fe 向外扩散形成的,氧化皮内层是由  $\text{O}_2$  或  $\text{H}_2\text{O}$  向内扩散形成的,这一点已经通过惰性原子(Au、Pt 等)标定实验的结果证实<sup>[10]</sup>。一些低合金钢的应用结果显示,氧化皮内层/外层界面的结合力较弱,是氧化皮剥落时常由此处开裂。

低合金钢的氧化皮厚度随着温度升高、氧化时间延长而增加,服役过程中可达到数百微米甚至毫米级别。T22 钢管在 540 °C/17.21 MPa 服役 20 000 h 时,其氧化皮厚度约为 250  $\mu\text{m}$ <sup>[11]</sup>。T22 钢管在 576 °C/4.3 MPa 服役  $15.6 \times 10^4$  h 后,其氧化皮厚度约为 300  $\mu\text{m}$ ,而在 516 °C/19.3 MPa 服役的钢管,氧化皮厚处达到 500  $\mu\text{m}$ 。文献[13]显示,T23 钢在 571/

543 °C 电站服役 10 年后,氧化皮厚度约 250  $\mu\text{m}$ <sup>[12]</sup>。服役结果表明,低合金钢氧化皮厚度受压力的影响十分显著,高压往往导致更快的氧化速率。

### 3 9%Cr 型钢的蒸汽氧化特征

9%Cr 型钢是目前应用十分广泛的一类锅炉用钢,其中 T/P91 钢由美国开发并纳入 ASME 标准中,使用广泛。T/P92 钢在 T/P91 钢的基础上添加了 W,优化了 Mo、B 等元素含量,进一步提高了高温持久强度,但抗蒸汽氧化能力却略低于前者。目前新开发的 9%Cr 系 G115 马氏体耐热钢通过增加 W、B 含量、添加 Co、控 N 等,进一步提高了热强性,使用温度可达到 650 °C,有望应用于 630~650 °C 级超超临界电站。

T/P91 钢和 T/P92 钢的氧化动力学普遍遵循幂函数规律,时间指数 0.3~0.5。随着氧化温度升高,氧化速率也明显提高,但不会像低合金钢一样向直线规律转变。P92 钢在 500~600 °C/25 MPa 环境下,氧化动力学都遵循立方规律(时间指数 ~0.33),温度提高会使氧化速率常数变大<sup>[14]</sup>。P92 钢在 400~550 °C 内,氧化动力学的时间指数和氧化速率常数都会随温度改变,且没有明显的趋势<sup>[15]</sup>。

9%Cr 型耐热钢生成的氧化皮结构与 2.25Cr 系耐热钢的氧化皮结构类似,如图 2<sup>[9,14]</sup> 所示,但氧化皮内层中 Cr 含量较高,可认为是富 Cr 层。氧化皮外层中的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  通常为柱状晶,其长轴方向垂直与内层/外层界面,而  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  通常只出现在最外侧,柱状晶结构不明显<sup>[16]</sup>。随着氧化皮厚度增加,氧化皮外侧中可能出现大量的空隙,导致氧化皮外层的进一步分层<sup>[17]</sup>。氧化皮内层主要有  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  或  $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{O}_4$  相组成,其晶粒为细小的等轴晶。氧化皮内层整体上看似致密,但实际上其内部存在大量的小尺寸孔洞缺陷<sup>[18]</sup>。

9%~12%Cr 型耐热钢的化学成分(主要是 Cr)刚好处于某一临界值附近,随着氧化环境的改

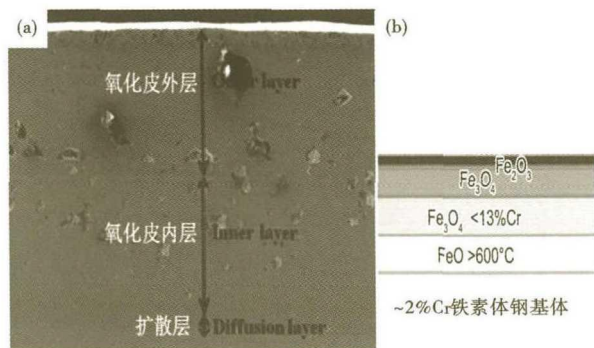


图 1 ~2%Cr 钢氧化皮形貌实例 (a)<sup>[8]</sup> 及示意图 (b)<sup>[9]</sup>  
Fig. 1 Morphology (a)<sup>[8]</sup> and schematics (b)<sup>[9]</sup> of oxide scale formed on ~2% Cr steel

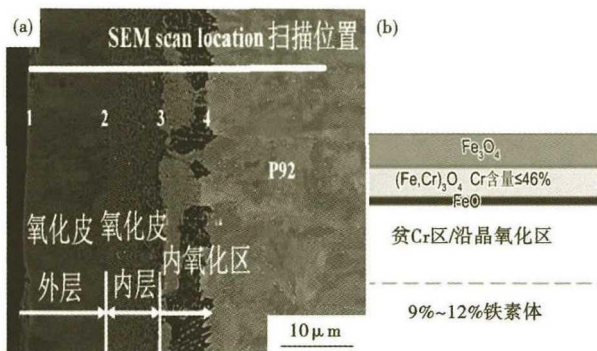


图 2 9% ~ 12% Cr 钢氧化皮形貌 (a)<sup>[14]</sup> 及示意图 (b)<sup>[9]</sup>  
 Fig. 2 Morphology (a)<sup>[14]</sup> and schematics (b)<sup>[9]</sup> of oxide scale formed on 9% ~ 12% Cr steel

变有时发生快速氧化,其氧化皮以  $Fe_3O_4$  相为主;有时则氧化速率很慢,其氧化皮以富 Cr 相为主<sup>[19-21]</sup>。因此,也称 9% ~ 12% Cr 钢为“边缘合金”,所谓的临界值正是由内氧化向外氧化转变的 Cr 的临界值。10% Cr-6% Co 钢在 625 °C 和 X20 钢在 600 °C 都发生了典型的外氧化<sup>[20]</sup>。G115 钢是含 9% Cr-3% W-3% Co 的新型马氏体耐热钢,在 650 °C 水蒸气中氧化时其氧化速率明显低于 P92 钢,如图 3。但也未生外氧化层,其氧化行为是介于 10% Cr ~ 6% Co 钢和 P92 钢的中间状态。

总体来讲,9% Cr 型钢的抗蒸汽氧化能力优于低合金钢<sup>[22-23]</sup>。9% Cr 钢在蒸汽氧化行为方面具有“边缘合金”的特性,因此在抗氧化性能提升方面具有很大潜力。但也有可能出现,在某一条件下抗氧化性良好,在另一条件下抗氧化性变差的情况。使用中应当警惕这种情况的发生。

#### 4 18-8 型钢的蒸汽氧化特征

18-8 型奥氏体耐热钢主要包括 TP347H, TP347HFG, S30432 (Super304H)。由于这类耐热钢

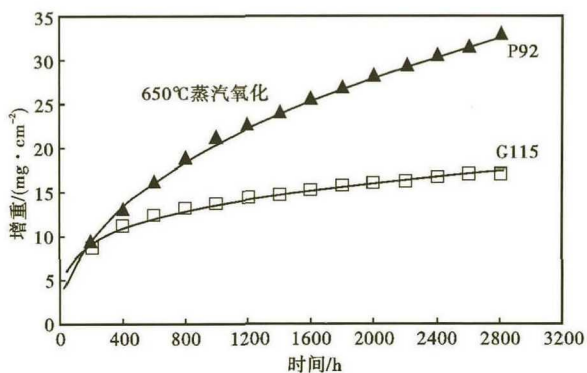


图 3 G115 钢与 P92 钢蒸汽氧化增重与氧化时间关系  
 Fig. 3 Relationship between weight gain and exposure time of G115 and P92 steels

可应用于过热器和再热器等部件。

TP347H 和 S30432 氧化动力学公式的时间指数在 0.3 左右波动<sup>[24-25]</sup>。温度变化对氧化速率影响显著,氧化速率随着温度的升高而显著加快。

18-8 型奥氏体耐热钢的氧化皮结构也呈分层现象,如图 4 所示。氧化皮外层同样是由 Fe 向外扩散形成的。由于氧化速率较低,有时候 18-8 型钢氧化皮呈瘤状,类似于局部氧化。这些瘤状物实际上由  $Fe_3O_4$  相组成的,相当于图 4 中氧化皮外层。氧化皮内层是由 O 向内扩散形成的。与低合金钢和 9% Cr 型钢不同,氧化皮内层与金属基体间的界面波动很大,这可能是由于奥氏体钢中的亚晶界数量少导致的。18-8 型钢氧化皮内层中的 Cr 含量及 Ni 含量较高,因而氧化皮内层的保护性更好。氧化皮内层中会形成断续的或连续的富 Cr 带,其 Cr 含量最高达 64%<sup>[26]</sup>。

研究结果显示,S30432 的氧化速率随着晶粒尺寸的增加而提高<sup>[27]</sup>。TP347HFG 是经过细晶化处理的 TP347H,经过细晶化处理后,抗蒸汽氧化性能有明显的提高。晶粒尺寸越小,组织中晶界的密度就越高。晶界是一种线缺陷,是元素的快速扩散通道,因此晶粒细化后合金元素的扩散也更快。由于 Cr 含量较高,细晶的 18-8 型耐热钢更容易形成富 Cr 带。但对于低合金钢,细化晶粒不仅不会提高材料的抗氧化能力,反而会加速氧化<sup>[28]</sup>。相比于细晶化,喷丸处理对抗氧化性能的提高更加显著,这可能是由于喷丸过程中不仅能细化表层晶粒,还大量增加了组织中的位错和亚晶界密度,同时残余应力也能增加氧化皮与基体之间的粘着力<sup>[29]</sup>。

虽然 18-8 型耐热钢的抗蒸汽氧化性能优于低合金钢和 9% Cr 型耐热钢,但在应用中比较容易发

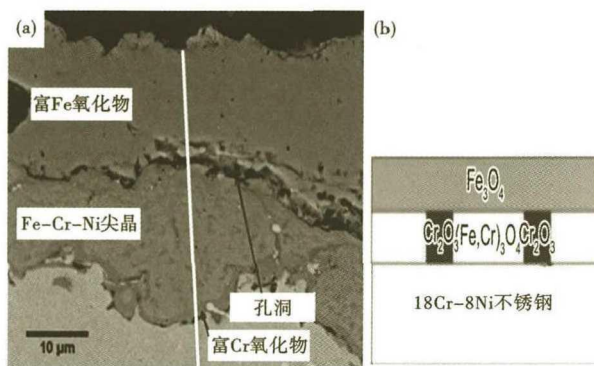


图 4 18Cr-8Ni 奥氏体钢氧化皮形貌 (a) 及示意图 (b)<sup>[19]</sup>  
 Fig. 4 Morphology (a) and schematics (b)<sup>[19]</sup> of oxide scale formed on 18Cr-8Ni austenitic steel

生氧化皮的剥落<sup>[30]</sup>。

## 5 改善耐热钢抗蒸汽氧化性能的措施

低合金钢很难在高温下仍保持良好的抗氧化能力,因此建议在 570 ℃ 以下使用低合金钢。而在更高温度应采用 9% 型钢或奥氏体钢。改变材料表面状态和环境氧分压是目前改善已有材料抗蒸汽氧化性能的主要措施。材料的表面状态对抗蒸汽氧化性能影响显著,TP347H、S30432 等奥氏体耐热钢的氧化速率随着光洁度增加而增加,同时还易引起氧化皮剥落<sup>[31]</sup>。经过切削加工或表面喷丸处的 TP347H 钢,其抗氧化速率要比经过酸洗处理的试样氧化速率更低<sup>[32]</sup>。切削加工和表面喷丸的作用是细化了表层晶粒,加速 Cr 原子向表层扩散的速度,从而加速了保护型氧化层的形成。目前,喷丸处理和细晶化已经在奥氏体耐热钢中广泛应用<sup>[33-34]</sup>。

除了采用机械喷丸处理,从金属学的角度,利用 TP347H 和 S30432 等钢中 Nb 的溶解和析出原理,采用荒管高温软化工艺或冷轧管不同道次之间的高温软化处理,使钢中含 Nb 析出相充分溶解,最后在末道次采用大变形,加上优化成品管固溶温度的方案,获得了细晶粒的 TP347HFG 钢管和细晶 S30432 钢管,综合性能优异,尤其是抗蒸汽氧化性能显著提升<sup>[38]</sup>,从图 5 可以看出,工艺优化后的 TP347H-M 表面涂覆、渗透是另一种改变材料表面状态的方法,与细晶化及喷丸处理不同,表面涂覆主要是改变材料表层的化学成分。通过渗 Cr 和 Mn 的方法和 S30432 (Super304H-M) 的抗蒸汽氧化性能明显优于早期开发的两种钢管。

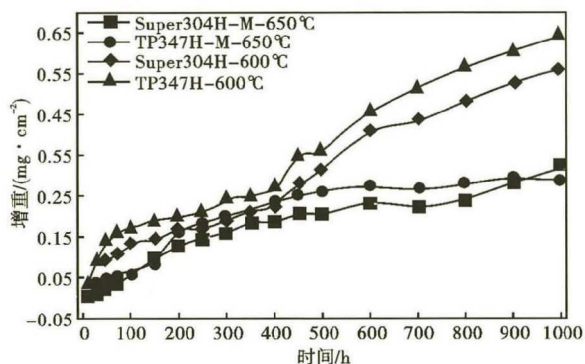


图 5 制管工艺优化后 Super304H 和 TP347H 钢管的蒸汽氧化增重与时间的关系

Fig. 5 Relationship between weight gain and exposure time of Super304H and TP347H steel tubes after optimizing the tube making process

表 2 提高耐热钢抗蒸汽氧化性能的常用方法

Table 2 Normal method for improving steam oxidation resistance of heat resistance steels

方法或工艺	使用对象
喷丸	奥氏体不锈钢
细晶化处理	奥氏体不锈钢
表面涂覆	9% ~ 12% Cr 马氏体耐热钢
表面渗 Al、Cr	9% ~ 12% Cr 马氏体耐热钢
表面纳米化	9% ~ 12% Cr 马氏体耐热钢

改善了 P91 和 P92 钢的抗氧化性能。渗 Cr、Mn 后 9% Cr 钢的氧化增重降低了一个数量级。Chang 等<sup>[35]</sup>通过热浸法在 9Cr1Mo 钢表面进行了 Al、Si 渗透<sup>[35]</sup>,在 P92 钢表面进行了 Al 涂覆<sup>[37]</sup>。表面处理后,9% Cr 钢的抗氧化性能都得到了显著的提升。涂覆、渗透后的表层已经不再是原来的材料,例如渗 Al 后的表层为 Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> 和 FeAl 相,Cr、Al、Si、Mn 等材料本身就具有良好的抗氧化能力,因此能够提高材料整体的抗氧化能力。需要注意的是渗透层的厚度以及渗透层与基体间的结合能力,保证全服役过程中涂覆层能够保护基体材料。表 2 总结了提高耐热钢抗蒸汽氧化性能的常用方法。

## 6 结束语

锅炉钢的蒸汽氧化行为会对火电站的运行效率和安全性产生重要的影响。因此,耐热钢的蒸汽氧化行为特征值得重视。低合金耐热钢、9% Cr 型马氏体耐热钢和 18Cr-8Ni 型奥氏体耐热钢三类材料,因其化学成分、组织等不同,故具有不同的氧化行为特征。低合金耐热钢的抗蒸汽氧化性能较差,生成的氧化皮厚,因此,不适用于 570 ℃ 以上服役的部件。9% Cr 型马氏体钢的抗蒸汽氧化性能居中,其蒸汽氧化行为随着化学成分和环境变化明显。而实验室结果与实际运行时的表现可能出现明显差异,应警惕 9% Cr 型钢在使用过程中由强抗氧化性向弱抗氧化性转变。18Cr-8Ni 型奥氏体耐热钢的氧化速率低,抗氧化能力强,但在使用过程中却更容易发生氧化皮剥落。因此使用中应关注是否发生氧化皮剥落以及管道内是否有氧化物塞积。喷丸处理能够较好的改善 18Cr-8Ni 型奥氏体钢的抗蒸汽氧化性能,但对于其它类型耐热钢的影响还有待研究。表面渗透、涂覆等表面改性方法能够显著提高耐热钢的抗蒸汽氧化性能。表面改性处理时应该注意工艺参数的可行性和改性后的效果,同时也需要注意后续处理是否会对部件表层造成不利影响。

科技部重点研发计划(2017YFB0305202)资助

## 参考文献

- [1] 包伟伟. 1000 MW 超超临界机组系统优化技术经济性分析[J]. 发电设备, 2017, 31(03): 154-158.
- [2] 薛清元, 李 辉, 丁常富, 等. 600 MW 等级亚临界机组超超临界改造的热力系统设计分析[J]. 汽轮机技术, 2018, 60(01): 49-52.
- [3] 龙 辉, 黄晶晶. “十三五”燃煤发电设计技术发展方向分析[J]. 发电技术, 2018, 39(01): 13-17.
- [4] Ehlers J, Young D J, Smaardijk E J, et al. Enhanced Oxidation of the 9% Cr Steel P91 in Water Vapour Containing Environments [J], Corrosion Science, 2006, 48: 3428-3454.
- [5] Nguyen T D, Zhang J, Young D J. Water Vapour Effects on Corrosion of Fe-Cr and Fe-Cr-Ni Alloys Containing Cerium and Manganese in CO<sub>2</sub> Gas at 818 °C [J], Corrosion Science, 2014, 89: 220-235.
- [6] 王起江, 洪 杰, 徐松乾, 等. 超超临界电站锅炉用关键材料[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(S1): 26-33.
- [7] 张乃强, 徐 鸿, 白 杨, 等. 溶解氧浓度对低合金钢 T24 在超临界水中氧化的影响[J], 中国几点工程学报, 2011, 31(35): 123-125.
- [8] Li H, Cao Q, Zhu Z High Temperature Oxidation Behavior of Ferritic Steel in Supercritical Water at 550-700 °C [J]. Materials at High Temperatures, 2018, 1-6.
- [9] Viswanathan R, Sarver J, Tanzosh J. M. Boiler Materials for Ultra-Supercritical Coal Power Plants-Steamside Oxidation, Journal of Materials Engineering and Performance, 2006, 15: 255-274.
- [10] Trindade V B, Borin R, Hanjari B Z, et al. High-Temperature Oxidation of Pure Fe and the Ferritic Steel 2. 25Cr1Mo [J]. Materials Research-Ibero-American Journal of Materials, 2005, 8 (4): 365-369.
- [11] 王正品, 张 路, 刘江南, 等. 电站用 T22 及与 T91 管高温蒸汽氧化的失效分析[J]. 铸造技术, 2004(07): 523-525.
- [12] 李 婷, 赵钦新, 王云刚, 等. STBA24 钢管蒸汽氧化的微观特征研究[J]. 动力工程学报, 2010, 30(04): 293-297, 303.
- [13] Komai N, Masuyama F, Igarashi M. 10-Year Experience With T23 (2. 25Cr-1. 6W) and T122 (12Cr-0. 4Mo-2W) in a Power Boiler [J]. Journal of Pressure Vessel Technology-Transactions of the Asme, 2004, 127 (2): 190-196.
- [14] 尹开锯, 邵绍宇, 唐 睿, 等. P92 钢在超临界水中的腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2010, 31(05): 334-337, 410.
- [15] Zhong X, Wu X, Han E-H. The Characteristic of Oxide Scales on T91 Tube After Long-Term Service in an Ultra-Supercritical Coal Power Plant [J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2012, 72: 68-77.
- [16] Tan L, Yang Y, Allen T R. Oxidation Behavior of Iron-Based Alloy HCM12A Exposed in Supercritical Water [J]. Corrosion Science, 2006, 48 (10): 3123-3138.
- [17] Ennis P J, Quadackers W J. Mechanisms of Steam Oxidation in High Strength Martensitic Steels [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2007, 84 (1-2): 75-81.
- [18] Gorman D M, Fry A T. Porosity Connectivity Within the Spinel Layer of the 9Cr Steel Grade 91 when Exposed to High-Temperature Steam [J]. Oxidation of Metals, 2017, 88 (3): 435-446.
- [19] Zurek J, De Bruycker E, Huysmans S, et al. Steam Oxidation of 9% to 12% Cr Steels: Critical Evaluation and Implications for Practical Application [J]. Corrosion, 2014, 70 (2): 112-129.
- [20] Zurek J, Wessel E, Niewolak L, et al. Anomalous Temperature Dependence of Oxidation Kinetics During Steam Oxidation of Ferritic Steels in the Temperature Range 550 ~ 650 °C [J]. Corrosion Science, 2004, 46(9): 2301-2317.
- [21] Zurek J, Hierro L N, Pironabellan J, et al. Effect of Alloying Additions in Ferritic 9% ~ 12% Cr Steels on the Temperature Dependence of the Steam Oxidation Resistance [J]. Materials Science Forum, 2004, 791-798.
- [22] Lukaszewicz M, Simms N J, Dudziak T, et al. Effect of Steam Flow Rate and Sample Orientation on Steam Oxidation of Ferritic and Austenitic Steels at 650 and 700 °C [J]. Oxidation of Metals, 2013, 79: 473-483.
- [23] Dudziak T, Lukaszewicz M, Simms N, et al. Analysis of High Temperature Steam Oxidation of Superheater Steels Used in Coal Fired Boilers [J]. Oxidation of Metals, 2016, 85: 171-187.
- [24] 徐明利. TP347H 和 TP304H 钢高温氧化行为的研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2010.
- [25] Zhang N, Cao Q, Gui J, et al. Oxidation and Chromia Evaporation of Austenitic Steel TP347HFG in Supercritical Water [J]. Materials at High Temperatures, 2018, 35 (5): 461-468.
- [26] Jia J, Montgomery M, Larsen O H, et al. Investigation of Steam Oxidation Behaviour of TP347H FG. Part 2: Exposure at 91 bar [J]. Materials and Corrosion-Werkstoffe Und Korrosion, 2005, 56 (8): 459-467.
- [27] Kim J H, Kim D I, Suwas S, et al. Grain-Size Effects on the High-Temperature Oxidation of Modified 304 Austenitic Stainless Steel [J]. Oxidation of Metals, 2013, 79: 239-247.
- [28] Raman S, Khanna A S, Tiwari R K, et al. Influence of Grain Size on the Oxidation Resistance of 241Cr-1Mo Steel [J]. Oxidation of Metals, 1992, 37(1): 1-12.
- [29] 李 健, 马云海, 杨小川, 等. 锅炉用 TP347HFG 和内壁喷丸 TP347H 奥氏体耐热钢抗蒸汽氧化性能对比研究[J]. 发电设备, 2019, 33(01): 16-20.
- [30] 柯道斌. 超超临界机组 TP347H 受热管内氧化皮堆积爆管分析与预防[J]. 科技创新与应用, 2017(05): 145.
- [31] 马云海. 超超临界锅炉用钢高温蒸汽氧化研究[D]. 上海: 上海发电设备成套设计研究院, 2013.
- [32] 张 波, 亓安芳, 金用强, 等. 表面状态对 TP347H 钢蒸汽氧化速度的影响[J]. 动力工程学报, 2012, 32(11): 903-908.
- [33] 岳增武, 李辛庚. 喷丸处理提高奥氏体耐热钢抗氧化性能的研究及应用[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(01): 157-162.
- [34] 李辛庚, 何家文. 喷丸处理提高 TP304H 耐热钢锅炉管抗水蒸气氧化性能应用效果的观察[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2003(03): 44-47.
- [35] Schmidt D, Galetz M, Schütze M. Improved Oxidation Resistance of Ferritic-Martensitic Steels in Water Vapour Containing Environments Via Diffusion Coatings [J]. Materials at High Temperatures, 2012, 29 (3): 159-165.
- [36] Chang Y-Y, Cheng W-J, Wang C-J. Growth and Surface Morphology of Hot-Dip Al-Si on 9Cr-1Mo Steel [J]. Materials Characterization, 2009, 60 (2): 144-149.
- [37] Agüero A, Muelas R, Pastor A, et al. Long Exposure Steam Oxidation Testing and Mechanical Properties of Slurry Aluminide Coatings for Steam Turbine Components [J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 200 (5-6): 1219-1224.
- [38] 包汉生, 张 伟, 梁宝琦, 等. 超超临界机组锅炉管用耐热钢抗蒸汽氧化性能研究, 世界金属导报[R], 2017; 8月29日, B03.

张 伟(1982-), 男, 钢铁研究总院在读博士生, 铌产品部总经理助理, 2005 年辽宁工程技术大学(本科)毕业, 不锈钢耐热钢和高温合金铌技术研究。  
E-mail: Zhangwei 3@citic.com

收稿日期: 2019-06-22