

DOI: 10.11973/jxgccl202308011

喷丸处理对 S31035 奥氏体耐热钢抗高温水蒸气氧化行为的影响

李 玉¹, 何思凡², 刘光明¹, 杨首恩², 柳志浩¹, 李富天¹

(1. 南昌航空大学材料科学与工程学院, 南昌 330063; 2. 东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 自贡 643001)

摘要: 对 S31035 钢进行喷丸处理, 再在 665 °C 下进行高温蒸汽氧化试验, 研究了喷丸处理对该钢抗高温水蒸气氧化行为的影响。结果表明: 未喷丸试样在氧化 100 h 后即出现明显的氧化物衍射峰, 氧化 3 000 h 后形成双氧化物层, 氧化膜厚度约为 8.07 μm ; 喷丸试样在氧化 1 000 h 后才出现微弱的 $(\text{Fe}, \text{Cr})_2\text{O}_3$ 衍射峰, 在氧化 3 000 h 后表面氧化膜仍然较薄, 厚度仅为 0.45 μm ; 在氧化过程中, 喷丸试样的氧化速率常数比未喷丸试样低 3 个数量级, 抗水蒸气氧化性能较好; 喷丸处理细化了表层晶粒, 为铬元素扩散提供了更多通道, 使表面形成 Cr_2O_3 保护膜而提高了该钢的抗高温水蒸气氧化性能。

关键词: 喷丸处理; 晶粒细化; S31035 钢; 水蒸气氧化**中图分类号:** TG174.4**文献标志码:** A**文章编号:** 1000-3738(2023)08-0065-07

Effect of Shot Peening on High Temperature Steam Oxidation Resistance of S31035 Austenitic Heat Resistant Steel

LI Yu¹, HE Sifan², LIU Guangming¹, YANG Shou'eng², LIU Zhihao¹, LI Futian¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. Dongfang Electric Group Dongfang Boiler Co., Ltd., Zigong 643001, China)

Abstract: The S31035 steel was shot peened, and then the high temperature steam oxidation test was carried out at 665 °C. The effect of shot peening on the high temperature steam oxidation behavior of the steel was studied. The results show that the unpeening sample had obvious oxide diffraction peaks after 100 h oxidation, and a double-layer of oxides was formed after 3 000 h oxidation. The oxide film thickness of the unpeening sample was about 8.07 μm . The weak $(\text{Fe}, \text{Cr})_2\text{O}_3$ diffraction peak appeared in the shot peening sample after 1 000 h oxidation, and the surface oxide film was still thin after 3 000 h oxidation, with a thickness of only 0.45 μm . In oxidation, the oxidation rate constant of the shot peening sample was 3 orders of magnitude lower than that of the unpeening sample, and the steam oxidation resistance was better. The shot peening refined the surface grains, which provided more channels for chromium diffusion and led to formation of a Cr_2O_3 protective film on the surface, thereby improved the high temperature steam oxidation resistance of the steel.

Key words: shot peening; grain refinement; S31035 steel; water vapor oxidation

0 引言

提高燃煤发电机组的蒸汽参数是提高机组效率

的手段之一; 蒸汽参数越高, 热循环效率越高^[1-2]。然而, 随着蒸汽参数的提高, 锅炉等机组主要设备尤其是过热器与再热器管道的腐蚀现象也越来越严重^[3]。研究蒸汽侧材料的氧化动力学以及氧化物的形貌和组成, 对于了解锅炉蒸汽腐蚀规律具有重要意义^[4]。喷丸处理是一种常用的表面处理技术, 可以细化钢管内壁表层晶粒, 形成高密度位错、层错结构。对于含铬不锈钢和高温材料, 喷丸处理可为铬元素提供扩散

收稿日期: 2022-06-13; **修订日期:** 2023-07-31**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51961028)**作者简介:** 李玉(1998—), 女, 江西南昌人, 硕士研究生**通信作者(导师):** 刘光明教授

通道,促进材料表面形成保护性富铬氧化物,降低氧化速率,提高耐腐蚀性能。研究^[5-6]表明,经喷丸处理后 S30432 钢在高温下的氧化速率可以降低约一个数量级。岳增武等^[7]对 Super304H 不锈钢和经过喷丸处理的 TP304H 不锈钢在蒸汽中的氧化行为进行研究,结果表明,后者的抗氧化性能优于耐腐蚀性更好的 Super304H 不锈钢,进一步体现了喷丸处理对提升不锈钢抗高温氧化性能的效果。

超(超)临界机组锅炉管内壁由于长期处于高温蒸汽环境,会发生较严重的氧化^[8-9]。而机组效率的进一步提升对锅炉管材的抗氧化性能提出了更高的要求^[10]。S31035 钢是新开发的 310 系列新型奥氏体耐热钢,其铬质量分数为 22.5%,具有良好的抗高温蒸汽氧化性能,可以用于制造 650~700 ℃超超临界机组锅炉用无缝钢管^[11]。目前该钢还处于研制阶段,尚未广泛用于 650 ℃以上的机组。鉴于喷

丸处理可以在一定程度上提升钢材的抗高温氧化性能,作者对 S31035 耐热钢进行了喷丸处理,并在 665 ℃下进行高温蒸汽氧化试验,研究了喷丸处理对该钢抗高温水蒸气氧化行为的影响,探讨了喷丸处理对提高抗氧化性能的作用机理。研究结果可为 S31035 不锈钢的工程应用提供一定的理论参考。

1 试样制备与试验方法

1.1 试样制备

试验材料为 S31035 新型奥氏体耐热钢管,化学成分见表 1。使用直径为 0.3 mm 的不锈钢钢丸对钢管进行内表面喷丸,喷嘴距内表面距离为 50 mm,喷丸压力为 0.5 MPa,喷丸时间为 10 min,覆盖率为 100%。如图 1 所示,在试验钢管上切取弧形水蒸气氧化试样。将试样置于丙酮中超声波清洗 10 min,吹干待用。

表 1 试验钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of test steel

元素	C	Cr	Ni	Nb	N	Cu	B	W	Co	Fe
质量分数/%	0.03	22.6	24.6	0.5	0.45	2.6	0.005	3.3	1.5	余

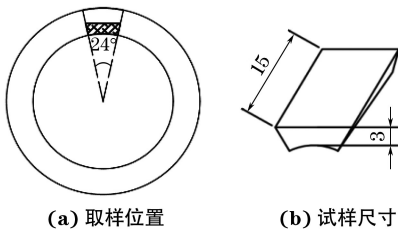


图 1 水蒸气氧化试样的取样位置与尺寸

Fig.1 Sampling location (a) and size (b) of water vapor oxidation specimen

1.2 试验方法

在 TL1200 型管式炉中进行高温蒸汽氧化试验,将试样置于管式炉的恒温区并抽真空,通入高纯氩气保持炉管内外气压平衡,然后加热至 665 ℃后通入 90%水蒸气+10%氩气(均为体积分数)的混合气体,分别氧化 100,500,1 000,1 500,2 000,2 500,3 000 h 后,随炉冷却至室温。

高温蒸汽氧化试验结束后,采用 Quanta 200 型扫描电子显微镜(SEM)观察试样表面形貌,经镶嵌、磨抛后,再观察试样表面氧化膜的截面形貌,使用 INCA 250 X-Max 50 型能谱仪(EDS)进行微区成分分析。测量不同氧化时间下氧化膜的平均厚度,绘制氧化动力学曲线,各测 3 个平行样。磨抛后的试样用腐蚀液(硫酸铜 10 g+氯化钠 25 g+质量分数 68%硝酸 40 mL+水 60 mL)浸蚀 3 min,再使

用 MA2000 型正置光学显微镜(OM)观察显微组织。使用 D8 advance-D8X 型 X 射线衍射仪(XRD)进行物相分析。

2 试验结果与讨论

2.1 物相组成

由图 2 可见:喷丸试样在氧化 100 h 后只有奥氏体相(基体)衍射峰,未出现氧化物衍射峰;当氧化时间达到 1 000 h 时出现微弱的氧化物衍射峰,氧化物物相主要为 (Fe,Cr)₂O₃;当氧化时间达到 3 000 h 时,氧化物衍射峰依旧很微弱,氧化物物相为 Cr₂O₃、(Fe,Cr)₂O₃ 等,相比之下基体衍射峰更强。由此可见,喷丸试样表现出优异的抗高温水蒸气氧化性能。对于未喷丸试样,在氧化 100 h 后基体的衍射峰弱于氧化物,随着氧化时间的延长,基体衍射峰逐渐减弱;当氧化时间达到 3 000 h 时主要出现氧化物衍射峰,氧化物主要为 Cr₂O₃、FeCr₂O₄、(Fe,Cr)₂O₃、NiFe₂O₄ 和 Fe₂O₃。一般来说,在高温水蒸气中,当钢中的铬质量分数大于 25%时,Fe-Cr 合金表面能形成长期稳定的保护性氧化膜^[12-13]。试验用 S31035 钢的铬质量分数小于 25%,其表面除了生成 Cr₂O₃ 保护性氧化膜外,还生成了 Fe₂O₃,而 Fe₂O₃ 进一步与合金元素反应生

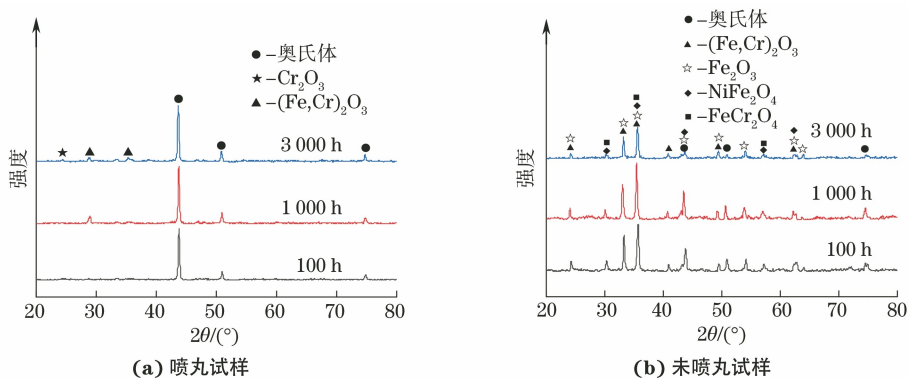


图2 665 °C 水蒸气氧化不同时间后喷丸与未喷丸试样的 XRD 谱

Fig.2 XRD patterns of shot peening (a) and unpeening (b) specimens after steam oxidation at 665 °C for different times

成 FeCr_2O_4 、 NiFe_2O_4 等尖晶石化合物,与 Cr_2O_3 反应形成固溶型氧化物 $(\text{Fe,Cr})_2\text{O}_3$ [14-15]。

2.2 显微组织及结构

由图 3 可见:在氧化前,相比于未喷丸试样,喷丸试样表面区域存在厚度为 20~30 μm 的碎化晶粒层(虚线间区域所示)。喷丸处理是一种常见的表面处理技术,会使工件表面产生晶粒碎化[16],形成一定厚度的碎化晶粒层[17]。在高温水蒸气环境下氧化 100,3 000 h 后,喷丸试样的碎化晶粒层并未消失,说明试样表面未发生回复再结晶。随着氧化时间延长,喷丸与未喷丸试样的晶粒均未见明显长大,其原因可能是在高温作用下,晶内析出了 M_{23}C_6 和细小的 $\text{Nb}(\text{C,N})$ 碳氮化物[18-19],起到了钉扎位错

的效果,阻碍了晶粒的生长。

由图 4 和图 5 可见,喷丸试样在氧化 100 h 后,表面凹坑边缘处开始出现针片状产物,该产物中的铬和氧元素含量较高,应是以 Cr_2O_3 为主的氧化物。这是因为 Cr_2O_3 的平衡氧分压远低于 Fe_2O_3 ,故生成 Cr_2O_3 的驱动力更大。其他区域未见明显氧化,这与喷丸处理使表面产生了大量缺陷且缺陷处更容易发生氧化有关。当氧化时间延长至 3 000 h 时,除了在凹坑边缘处出现针片状氧化物,喷丸试样表面还生成了均匀致密的氧化膜颗粒。此颗粒状氧化物的铬含量较针片状氧化物低,可能是 Fe_2O_3 和 Cr_2O_3 反应形成的 $(\text{Fe,Cr})_2\text{O}_3$ 化合物。未喷丸试样在氧化 100h 后,其表面覆盖着大量由颗粒状氧

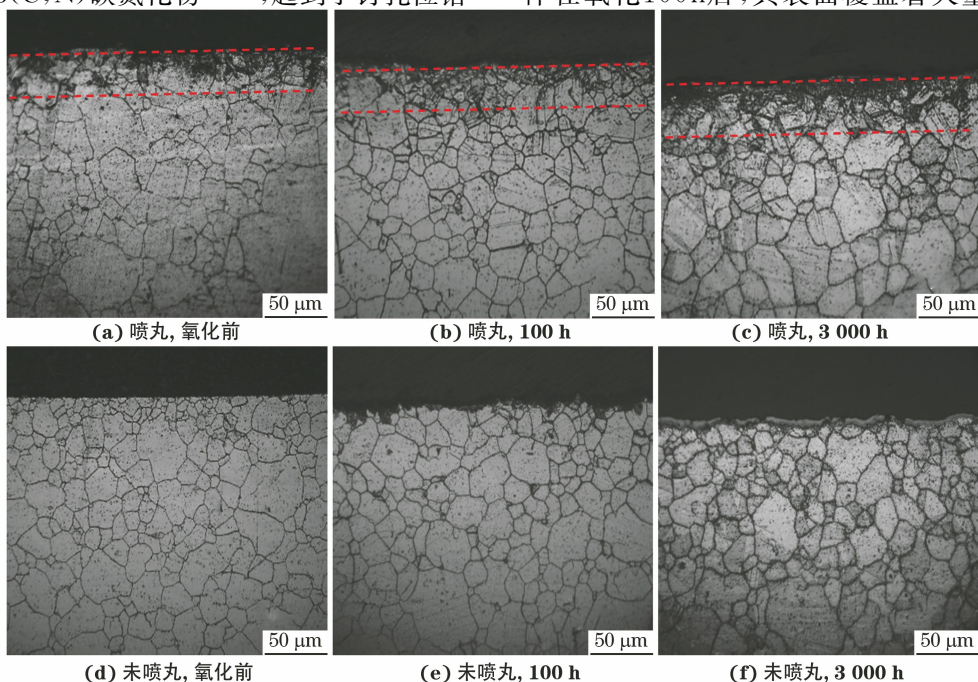


图3 喷丸与未喷丸试样在高温水蒸气下氧化前后的显微组织

Fig.3 Microstructures of shot peening (a-c) and unpeening (d-f) specimens before (a, d) and after (b, c, e, f) oxidation under high-temperature water vapor

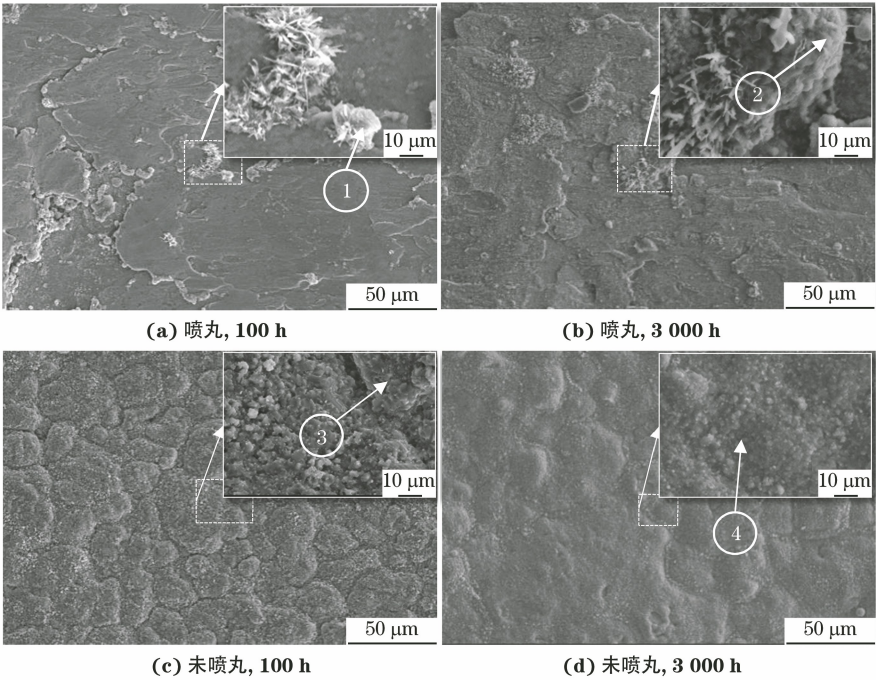


图 4 喷丸与未喷丸试样在高温水蒸气下氧化不同时间后的表面形貌

Fig.4 Surface morphology of shot peening (a—b) and unpeening (c—d) specimens after oxidation for different times under high-temperature water vapor

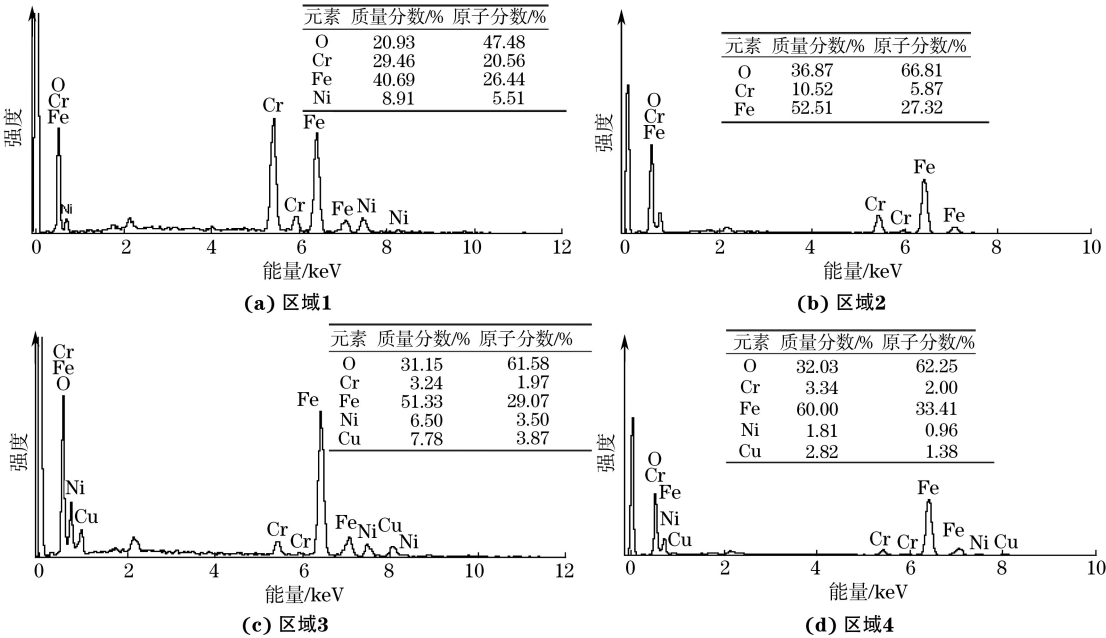


图 5 喷丸与未喷丸试样在高温水蒸气下氧化不同时间后表面不同位置(见图 4)的 EDS 谱

Fig.5 EDS spectra at different positions (shown in Fig.4) on surface of shot peening and unpeening specimens after oxidation under high temperature water vapor for different times: (a) area 1; (b) area 2; (c) area 3 and (d) area 4

化物组成的边界清晰的“瘤状”氧化物;氧化 3 000 h 后,大部分“瘤状”氧化物已经互相合并,边界变得模糊。这些“瘤状”氧化物的铁含量很高,铬含量偏低,结合 XRD 物相分析结果可知,此氧化物主要由 Fe_2O_3 和一系列铁铬尖晶石化合物组成。喷丸试样与未喷丸试样表面氧化行为的不同是因为喷丸处理

不仅会引入高密度位错、亚结构、孪晶等晶体缺陷^[16],为铬提供更多的快速扩散通道,还可以使表面处于高能状态,为铬提供额外的扩散驱动力。

由图 6 和图 7 可见:在氧化 100 h 后,喷丸试样截面仅存在极薄氧化物层,氧化程度轻微;氧化 3 000 h 后,试样在喷丸导致的裂纹处发生氧化,形

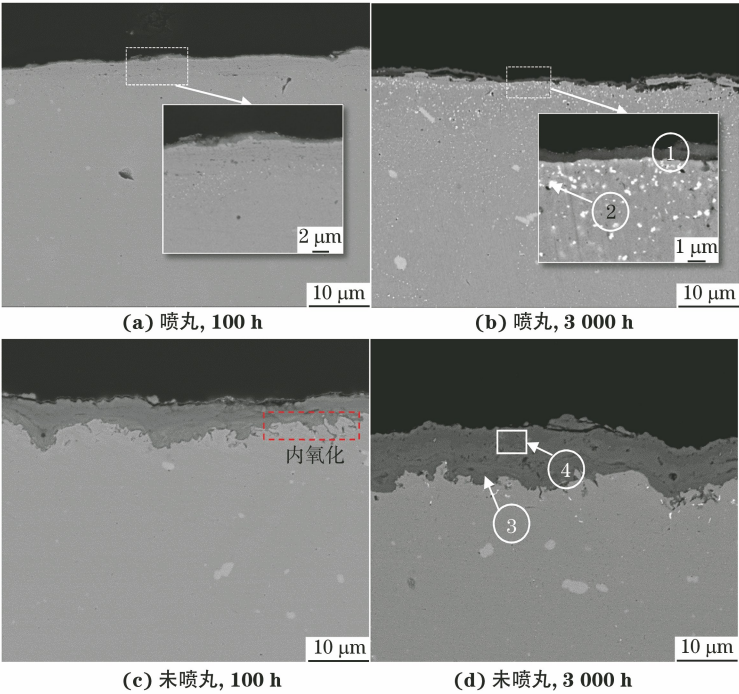


图 6 喷丸与未喷丸试样在高温水蒸气下氧化不同时间后的截面形貌

Fig.6 Cross section morphology of shot peening (a—b) and unpeening (c—d) specimens after oxidation for different times under high-temperature water vapor

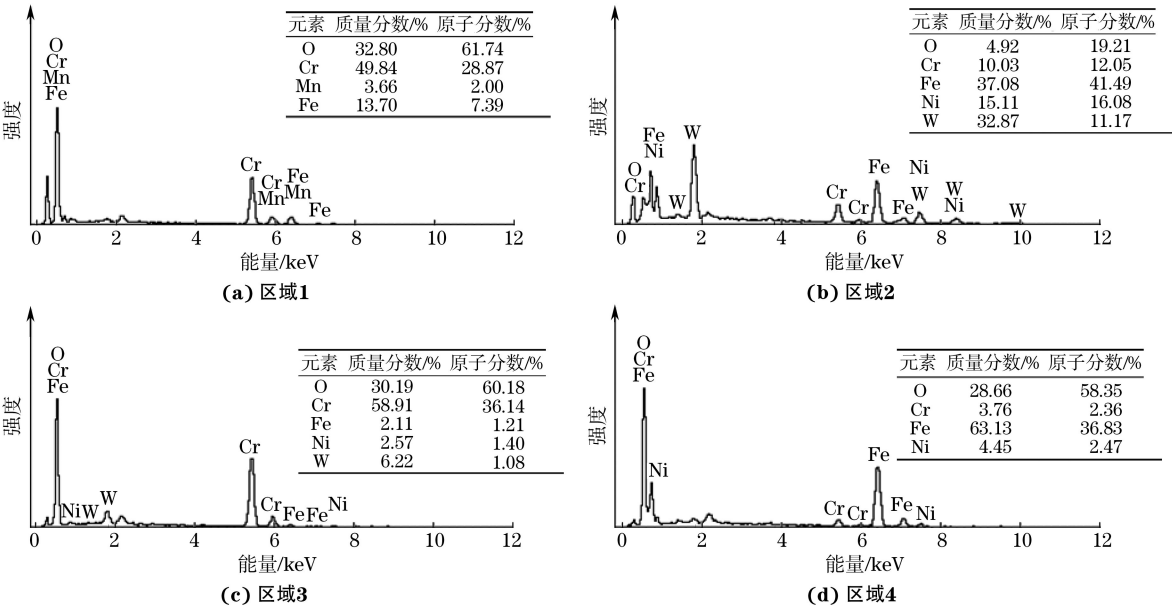


图 7 喷丸与未喷丸试样在高温水蒸气下氧化 3 000 h 后截面不同位置(见图 6)的 EDS 谱

Fig. 7 EDS spectra at different positions (shown in Fig. 6) on cross section of shot peening and unpeening specimens after oxidation under high temperature water vapor for 3 000 h

成的表面氧化膜仍然较薄,说明氧化膜具有良好的抗水蒸气氧化性能。喷丸试样氧化 3 000 h 后,其表面氧化膜(区域 1)中铬含量较高,结合 XRD 分析可知氧化膜中主要为 Cr_2O_3 相。氧化 3 000 h 后喷丸试样基体表层出现白点,白点处钨含量较高。未喷丸试样氧化 100 h 后表面形成了较厚的氧化层,部分氧

化物楔入基体,出现内氧化现象;氧化 3 000 h 后,试样表面形成了连续双氧化层,内层(区域 3)铬含量相对较高,外层(区域 4)铁元素含量较高,这是因为铁在氧化膜中的扩散速率大于铬^[20-21],会通过氧化膜快速向外扩散并发生氧化形成铁的氧化物。此外,铁在向外扩散过程中还可以与 Cr_2O_3 发生固相

反应,生成尖晶石化合物 $(\text{Fe,Cr})_2\text{O}_3$ 。当温度与合金种类不变时,扩散系数 D 与扩散激活能有关^[20],一般来说,晶内扩散所需要的激活能多于晶界扩散,因此晶界越多,扩散越快^[22]。喷丸处理会使材料表面晶粒细化,晶界数量增加,从而促进铬的快速扩散。铬的快速扩散使表面铬含量提高,生成 Cr_2O_3 保护性氧化膜,故喷丸试样抗水蒸气氧化性能更好。

2.3 氧化动力学

由图 8 可见,在高温水蒸气环境中,未喷丸试样在氧化初期(0~100 h)表面氧化膜厚度的增长速率较快,此时合金与水蒸气反应的界面过程是反应的控制步骤;随着氧化时间的延长,氧化膜的增厚速率减缓,氧化速率逐渐降低,此时反应由离子通过氧化膜的扩散过程控制。喷丸试样表面的氧化膜厚度随氧化时间的延长变化较小,在氧化 3 000 h 后氧化

膜的厚度约为 $0.45\ \mu\text{m}$;未喷丸试样表面氧化膜的厚度明显高于喷丸试样,约为 $8.07\ \mu\text{m}$ 。对喷丸和未喷丸处理试样氧化膜厚度的平方与氧化时间进行拟合,拟合结果均呈较好的线性关系,表明氧化膜厚度与氧化时间之间符合抛物线规律。拟合方程如下:

$$y^2 = \begin{cases} 3.95 \times 10^{-5}t + 0.084 & (\text{喷丸}) \\ 1.75 \times 10^{-2}t + 12.81 & (\text{未喷丸}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: y 为试样表面氧化膜的厚度, μm ; t 为氧化时间, h。

喷丸试样的氧化速率常数为 $3.95 \times 10^{-5}\ \mu\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$,比未喷丸试样低约 3 个数量级^[12]。曲线拟合方程中存在常数项是因为试样初期的氧化通常受界面反应控制,氧化膜生长速率较快,在氧化初期会偏离抛物线生长规律。

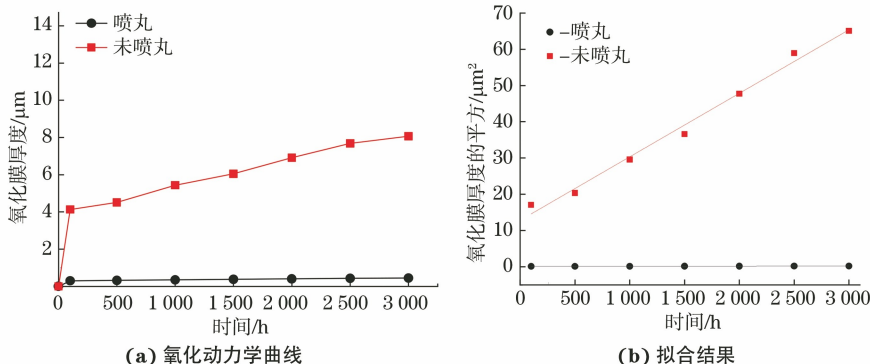


图 8 喷丸与未喷丸试样在高温水蒸气中的氧化动力学曲线和拟合结果

Fig. 8 Oxidation kinetics curves (a) and fitting results (b) of shot peening and unpeening specimens in high temperature water vapor

3 结 论

(1) S31035 钢喷丸试样在氧化 1 000 h 后开始出现微弱的氧化物衍射峰,氧化产物主要为 $(\text{Fe,Cr})_2\text{O}_3$;未喷丸试样氧化 100 h 后就出现明显的氧化物衍射峰,氧化产物主要为 Cr_2O_3 、 FeCr_2O_4 、 $(\text{Fe,Cr})_2\text{O}_3$ 、 NiFe_2O_4 和 Fe_2O_3 ,氧化 3 000 h 后形成双氧化物层。

(2) 喷丸试样在氧化 3 000 h 后表面氧化膜仍然较薄,约为 $0.45\ \mu\text{m}$,远小于未喷丸试样的 $8.07\ \mu\text{m}$ 。喷丸处理在试样表面引入大量晶体缺陷,为铬元素向外扩散提供了快速通道,形成了 Cr_2O_3 保护性氧化膜,提高了抗氧化性能。

(3) 在高温水蒸气氧化过程中,喷丸试样的氧化速率常数比未喷丸试样低 3 个数量级,喷丸处理能显著提高 S31035 钢的抗高温水蒸气氧化性能。

参考文献:

- [1] 周慧云,洪嘉,黄健航,等. 超临界锅炉用材料的高温腐蚀研究进展[J]. 表面技术,2016,45(11):145-152.
ZHOU H Y, HONG J, HUANG J H, et al. Research progress on the high temperature corrosion of supercritical boiler materials[J]. Surface Technology, 2016, 45(11): 145-152.
- [2] 李辛庚,齐慧滨,王学刚,等. 火电厂锅炉再热器管高温腐蚀研究[J]. 材料保护,2003,36(6):9-11.
LI X G, QI H B, WANG X G, et al. High temperature corrosion of TP304H boiler re-heater tubes[J]. Materials Protection, 2003, 36(6): 9-11.
- [3] 方旭东,李阳,夏焱,等. 新型耐热合金 TG700C 热变形及动态再结晶行为[J]. 材料热处理学报,2016,37(9):92-99.
FANG X D, LI Y, XIA Y, et al. Hot deformation and dynamic recrystallization behavior of new heat resistant alloy TG700C[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2016, 37(9): 92-99.
- [4] Design guidelines for corrosion, erosion and steam oxidation of boiler tubes in pulverized coal-fired boilers; STP-PT-066-2014

- [S]. New York: ASME Standards Technology LLC, 2014.
- [5] 赵慧传,唐丽英,贾建民,等. 喷丸处理对 S30432 锅炉管抗蒸汽氧化性能的影响[J]. 中国电力, 2014, 47(4): 9-13.
- ZHAO H C, TANG L Y, JIA J M, et al. Influences of shot blasting on steam oxidation resistance of S30432 boiler tubes [J]. Electric Power, 2014, 47(4): 9-13.
- [6] 王智春,蔡文河,韩哲文,等. 喷丸处理对 S30432 钢 650 °C 蒸汽氧化行为的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(2): 42-47.
- WANG Z C, CAI W H, HAN Z W, et al. Effects of shot peening on oxidation behavior of S30432 steel in steam at 650 °C [J]. Surface Technology, 2018, 47(2): 42-47.
- [7] 刘宇钢,刘银河,莫春鸿,等. 630 °C 煤电锅炉用 S31035 管材的高温腐蚀性能[J]. 表面技术, 2022, 51(4): 176-182.
- LIU Y G, LIU Y H, MO C H, et al. High temperature corrosion of S31035 for 630 °C coal-fired power plant boiler [J]. Surface Technology, 2022, 51(4): 176-182.
- [8] ZHANG N Q, ZHU Z L, YUE G Q, et al. The oxidation behaviour of an austenitic steel in deaerated supercritical water at 600—700 °C [J]. Materials Characterization, 2017, 132: 119-125.
- [9] 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(1): 157-162.
- YUE Z W, LI X G. Research and application of shot peening on oxidation resistance of austenitic steels in steam [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2013, 34(1): 157-162.
- [10] 刘巍栋,蔡文河,赵勇,等. 630~650 °C 超超临界参数锅炉受热面管备选材料建议[J]. 钢铁研究学报, 2021, 33(9): 891-900.
- LIU W D, CAI W H, ZHAO Y, et al. Suggestion on alternative heated surface tube materials for 630—650 °C ultra-supercritical units [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2021, 33(9): 891-900.
- [11] 王玲,向军淮,张洪华,等. 3 种不同 Cr 含量 Co-20Re-Cr 合金在 1 000 和 1 100 °C 的高温氧化行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2019, 39(1): 83-88.
- WANG L, XIANG J H, ZHANG H H, et al. High temperature oxidation behavior of three Co-20Re-xCr alloys in 3.04×10^{-5} Pa oxygen at 1 000 and 1 100 °C [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2019, 39(1): 83-88.
- [12] BIRKS N, MEIER G H, PETTIT F S. 金属高温氧化导论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- BIRKS N, MEIER G H, PETTIT F S. Introduction to the high-temperature oxidation of metals [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [13] 张骏,蔡文河,杜双明,等. 喷丸奥氏体耐热钢抗蒸汽氧化性的研究与使用现状[J]. 表面技术, 2020, 49(9): 133-140.
- ZHANG J, CAI W H, DU S M, et al. Research and application status of steam oxidation resistance of shot peening austenitic heat-resistant steel [J]. Surface Technology, 2020, 49(9): 133-140.
- [14] PARK D J, KIM H G, PARK J Y, et al. A study of the oxidation of FeCrAl alloy in pressurized water and high-temperature steam environment [J]. Corrosion Science, 2015, 94: 459-465.
- [15] 王志民,刘光明,吴世强,等. 热处理对 S30432 喷丸不锈钢抗高温水蒸气氧化性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2019, 40(2): 124-132.
- WANG Z M, LIU G M, WU S Q, et al. Effect of heat treatment on high temperature steam oxidation resistance of shot blasted S30432 stainless steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2019, 40(2): 124-132.
- [16] 王锐坤,郑志军,高岩. 表面喷丸工艺对 Super304H 奥氏体耐热钢组织与性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(4): 903-909.
- WANG R K, ZHENG Z J, GAO Y. Effect of surface shot peening on microstructure and properties of Super304H austenitic heat-resistant steels [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(4): 903-909.
- [17] 杨首恩,杨华春,刘盛波. 喷丸处理对 18-8 型奥氏体耐热钢抗蒸汽氧化性能的影响[J]. 发电设备, 2019, 33(3): 189-192.
- YANG S E, YANG H C, LIU S B. Influence of shot peening on steam oxidation resistance of 18-8 type austenitic heat-resistant steels [J]. Power Equipment, 2019, 33(3): 189-192.
- [18] 崔忠圻,覃耀春. 金属学与热处理 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- CUI Z Q, QIN Y C. Metallurgy and heat treatment [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [19] 尹泽华,周永莉,鲁金涛,等. 700 °C 下 Nb 对 HR3C 奥氏体耐热钢蒸汽氧化行为的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(12): 267-273.
- YIN Z H, ZHOU Y L, LU J T, et al. Effect on steam oxidation behavior of HR3C austenitic steels at 700 °C [J]. Surface Technology, 2020, 49(12): 267-273.
- [20] 胡庚祥,蔡珣,戎咏华. 材料科学基础 [M]. 3 版. 上海: 上海交通大学出版社, 2011.
- HU G X, CAI X, RONG Y H. Fundamentals of materials science [M]. 3rd ed. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2011.
- [21] 张新宇,王磊,王尧,等. 静电场处理对 GH4169 合金中 Fe、Cr 元素扩散行为的影响[J]. 钢铁研究学报, 2011, 23(增刊 2): 146-149.
- ZHANG X Y, WANG L, WANG Y, et al. Effect of electrostatic-field treatment on the diffusion behaviors of Fe and Cr in GH4169 superalloy [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2011, 23(S2): 146-149.
- [22] 李铁藩. 金属高温氧化和热腐蚀 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- LI T F. High temperature oxidation and thermal corrosion of metals [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.