

装备防护

S31254 超级奥氏体不锈钢高温氧化行为及涂层防护研究

邢佳¹, 刘承志¹, 李爱民², 王守明², 张欣杰², 史咏鑫², 于瑞恩^{1a}

(1.中北大学 a.机械工程学院 b.特种金属材料与装备研究院, 太原 030051;

2.中航上大高温合金股份有限公司, 河北 邢台 054800)

摘要: **目的** 通过研究高温氧化特征, 定量分析抗氧化涂层对 S31254 超级奥氏体不锈钢在热处理过程中氧化速率的影响。**方法** 通过热重分析实验测定 S31254 超级奥氏体不锈钢恒温氧化增量曲线, 调查试样在不同温度下退火过程中的氧化烧损现象, 并分析退火试样的纵截面氧化层微观形貌。**结果** 实验结果显示, 当加热温度达到 1 300 °C 后, 试样的氧化增量曲线由原先的抛物线规律逐渐向线性规律转变。由于 MoO₃ 易于挥发, 造成了试样高温氧化烧损严重。当退火温度为 1 220 °C 时, 试样在空气中的平均单面烧损速率约为 4.0 μm/h; 而当使用抗氧化涂层后, 平均单面烧损速率降至 3.2 μm/h, 涂层防护效果显著。试样在 1 220 °C 下退火时生成的氧化层可分为 2 层, 分别是 Cr、Fe 氧化物组成的内氧化层和 Fe 氧化物组成的外氧化层。**结论** 研究结果证明, 抗氧化涂层能够显著降低 S31254 超级奥氏体不锈钢在 1 220 ~ 1 280 °C 下的氧化速率。

关键词: 超级奥氏体不锈钢; 高温氧化; 涂层防护; 氧化动力学; 烧损; 氧化层

中图分类号: TB484.4; TG142.71 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)07-0286-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.07.033

High-temperature Oxidation Behavior and Coating Protection of S31254
Super Austenitic Stainless SteelXING Jia¹, LIU Cheng-zhi¹, LI Ai-min², WANG Shou-ming², ZHANG Xin-jie²,
SHI Yong-xin², YU Rui-en^{1a}

(1. a. School of Mechanical Engineering b. Institute of Special Metal Materials and Equipment, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Avic Shangda Superalloys Company Limited, Hebei Xingtai 054800, China)

ABSTRACT: The work aims to quantitatively analyze the effect of anti-oxidation coating on the oxidation rate of S31254 super austenitic stainless steel during heat treatment by studying the characteristics of high-temperature oxidation. The oxidation weight-gained curve of S31254 super austenitic stainless steel at constant temperature was measured by thermogravimetric analysis experiment. The oxidation loss of specimen was investigated during annealing at different temperature, and the microstructure of the oxide layer in the longitudinal section of the annealed specimen was analyzed. The results showed that when the annealing temperature reached 1 300 °C, the oxidation weight-gained curve of the specimen gradually changed from the original parabolic law to the linear law. The high-temperature oxidation loss of the specimen was serious because MoO₃ was easy to gasify. When the annealing temperature was 1 220 °C, the average single-sided oxidation loss rate of the specimen in air was about 4.0 μm/h. When the anti-oxidation coating was used, the average sin-

收稿日期: 2022-09-04

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (51902294); 山西省基础研究计划 (20210302124044)

作者简介: 邢佳 (1986—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为金属包装材料制备与表征。

通信作者: 于瑞恩 (1987—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为智能包装技术。

gle-sided oxidation loss rate decreased to 3.2 μm/h. The protective effect of the coating was remarkable. The oxide layer formed in the process of annealing at 1 220 °C could be divided into two parts, which were the inner oxide layer composed of oxides of Cr and Fe and the outer oxide layer composed of oxides of Fe. The results illustrate that the anti-oxidation coating can significantly reduce the oxidation rate of S31254 super austenitic stainless steel at 1 220~1 280 °C.

KEY WORDS: super austenitic stainless steel; high-temperature oxidation; coating protection; oxidation kinetics; oxidation loss; oxide layer

S31254 超级奥氏体不锈钢是一种耐腐蚀性能极其优异的高合金含量不锈钢, 可以用作许多苛刻环境下的金属包装结构材料^[1], 广泛应用于石油化工、废水处理及核能核电等领域。S31254 超级奥氏体不锈钢中含有质量分数为 6%左右的 Mo 元素, 导致在凝固组织的树枝状晶之间容易析出富 Mo 的 σ 相, 引起合金元素偏析^[2-3]。偏析现象会显著影响钢锭的热加工性能, 因此, S31254 超级奥氏体不锈钢热加工之前需要进行长时间的高温扩散退火, 以促进 σ 相溶解, 消除合金元素偏析^[4-5]。在此过程中, 钢锭表面需要长时间受到高温空气环境的作用, 因此, 高温氧化行为对这类钢的成材率有着直接的影响。

很多学者研究了超级奥氏体不锈钢的高温氧化特征。张彬彬^[6]研究了 S32654 超级奥氏体不锈钢在 900、1 000 及 1 200 °C 下热处理 5 h 内的氧化动力学行为及氧化产物形貌, 认为当温度高于 1 000 °C 时, MoO₃ 的挥发以及空气中的氮向内扩散提高了氧化层的增厚速度, 加剧了试样的氧化损失。Dong 等^[7]分析了 S32654 超级奥氏体不锈钢在 900 °C 下热处理 5 h 内的氧化产物类型。结果显示, 总的氧化层分为内、外 2 层, 分别由富 Fe、Cr 的内层氧化物和富 Mo 的外层氧化物组成。Li 等^[8]系统地讨论了 S32654 超级奥氏体不锈钢在 1 200 °C 以下温度热处理时的氧化行为。研究发现, 当温度为 900 °C 时, 氧化增量曲线符合抛物线规律; 当 Mo 的氧化产物挥发后, 氧化增量曲线转向线性规律。当温度为 1 000 °C 或 1 200 °C 时, 氧化增量曲线均遵守线性规律。综上可知, 目前关于超级奥氏体不锈钢高温氧化特征的研究主要针对 7Mo 型的 S32654 钢种在短期热处理条件下开展的。然而, 对 6Mo 型的 S31254 超级奥氏体不锈钢在长期热处理过程中的氧化行为研究仍较少, 缺乏详细可靠的研究数据。

本文结合实际加工需求, 研究 S31254 超级奥氏体不锈钢在长时间高温热处理过程中的表面氧化行为; 建立等温氧化动力学曲线, 利用 SEM 对氧化层组成进行分析, 并调查防护涂层对试样在空气中加热时氧化损失的影响, 为钢锭的高效生产提供实验数据支持。

1 实验

1.1 材料

实验用 S31254 超级奥氏体不锈钢经 AOD-LF 精

炼后浇铸成铸锭, 其化学成分如表 1 所示。

表 1 实验用 S31254 超级奥氏体不锈钢化学成分 (质量分数)

Tab.1 Chemical composition of the S31254 super austenitic stainless steel %									
C	Cr	Ni	Mo	Mn	Al	Cu	Si	P	S
0.011	19.74	18.12	6.13	0.46	0.032	0.64	0.30	0.024	0.001

1.2 方法

测定氧化特征的块状试样取自铸锭的冒口部位, 经线切割加工成不同规格后, 分别在 RZ 型热重分析仪 (洛阳谱瑞慷达) 上进行恒温氧化增量实验以及在 KSL-1700X-A3 型高温箱式炉 (合肥科晶) 中进行空气气氛下的氧化烧损实验。热重分析仪采用工业 IPC 机进行全自动控制, 测量精度为 0.01 g, 数据采集频率为 1 次/min, 设备升温速率为 20 °C/min, 分析温度分别为 1 150、1 200、1 250 和 1 300 °C, 保温时间为 500 min。氧化烧损实验需要取数量相同的 2 组块状试样进行对照实验, 其中一组试样涂覆抗氧化剂涂层, 另一组试样未涂覆。抗氧化剂由 Al₂O₃、SiO₂、Na₂O、Cr₂O₃、CaO、Fe₂O₃ 等组成, 加水分散后经球磨制备得到混合浆料, 外观呈砖红色。使用前, 将抗氧化剂涂料涂覆在试样各个表面处, 涂层厚度约为 600 μm。氧化烧损实验所用块状试样的规格为 20 mm×20 mm×20 mm, 在加热过程中需放入规格为 φ40 mm×50 mm 坩埚中, 以 10 °C/min 的速率升温至退火温度, 即 1 220、1 250 和 1 280 °C, 其中 1 220 °C 和 1 250 °C 下试样的保温时间为 45 h, 1 280 °C 下试样的保温时间为 16 h。保温结束后将试样取出空冷, 观察、称量并测量尺寸。

选取在 1 220 °C 下退火 35 h 后的试样进行纵截面氧化层的 SEM 微观分析, 并通过 EDS 分析不同位置处的氧化产物化学组成。由于此时氧化层不稳定, 需要首先进行镶嵌封固。试验经金相磨抛处理后, 进行表面喷金, 随后置于 Zeiss Sigma-300 场发射扫描电子显微镜 (德国 Carl Zeiss) 下进行显微组织表征。

2 实验结果与分析

2.1 恒温氧化增量曲线

图 1 是 S31254 超级奥氏体不锈钢在 1 150~1 300 °C

下的恒温氧化增量曲线。可以看出,随着氧化温度的升高或者加热时间的延长,试样增量逐渐增加。当温度为 1 150~1 250 °C 时,随着加热时间的延长,试样的增量曲线呈抛物线型规律,这与大多数奥氏体不锈钢相类似^[9-11];当温度达到 1 300 °C 时,试样的增量曲线已接近线性规律,说明在此温度左右,试样的氧化速度急剧增加,氧化层生长的速度远高于其他温度下试样的。

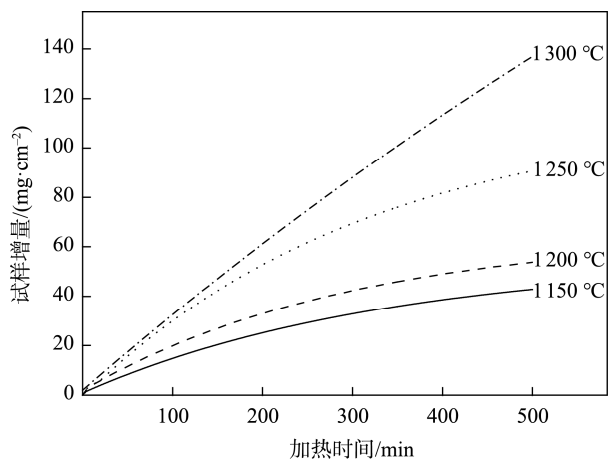


图1 S31254 超级奥氏体不锈钢在不同温度下的氧化增量曲线

Fig.1 Oxidation weight-gained curves of S31254 super austenitic stainless steel at different temperature

2.2 试样的氧化烧损行为

图 2 显示的是有抗氧化涂层与无抗氧化涂层试样经 1 250 °C 下退火 10 h 后的宏观形貌。可以看出,有抗氧化涂层试样的表面氧化产物较少,表现出良好的高温氧化防护效果;无抗氧化涂层试样表层发生鼓包、凸起等现象,氧化层明显增厚,导致试样的尺寸较原始尺寸显著增加,表层氧化物较疏松,包含较多的孔洞与缝隙,且部分氧化层已发生脱落。

图 3 给出了 1 280 °C 下氧化烧损实验中试样的质量变化结果。对有抗氧化涂层的试样来说,在不同退火时间下,试样与坩埚的总质量(如图 3 中黑色方块)仅发生有限程度的增加(质量差 ≤ 6 g)。然而,当扣除坩埚质量,仅考虑试样本身的质量变化时(如图 3 中三角),质量变化曲线延伸到了纵轴的负半轴,即出现了质量的减少,这一现象在退火 16 h 后的试样中尤为明显。

在高温下,钢中的 Mo 元素与空气中的 O_2 发生反应,首先生成 MoO_2 , MoO_2 被进一步被氧化生成 MoO_3 。 MoO_3 的沸点为 1 155 °C,其蒸气压非常高,在高温下极易气化。有文献报道 MoO_3 在 700 °C 时就已大量挥发^[12-13]。 MoO_3 的挥发以及氧化产物的脱落导致氧化后块状试样质量显著降低。为了准确判断高温氧化对 S31254 块状试样的影响,将氧化后试样表面的疏松氧化层运用机械振动方法去除,称量,并与氧化前的

试样质量进行对比,绘制氧化烧损减量曲线。在 1 220 °C 下,有无抗氧化涂层试样的减量曲线如图 4 所示。从图 4a 中可以看出,对于未涂覆抗氧化涂层的试样,在退火时间 10~45 h 内,试样总体的质量减少率为 28.9%~57.1%;而从图 4b 中有抗氧化涂层试样的减量曲线可以看出,退火时间在 70 h 以内时,质量减少率大幅降低,维持在 1.29%~3.82% 水平。抗氧化涂层的存在显著提高了试样在该温度下的氧化防护能力。

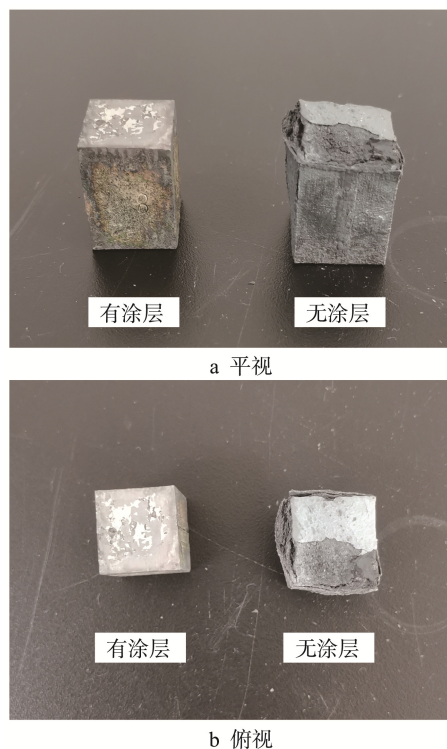


图2 有抗氧化涂层与无抗氧化涂层块状试样高温氧化后的宏观形貌
Fig.2 Macroscopic morphologies of bulk specimens with and without anti-oxidation coating after high-temperature oxidation

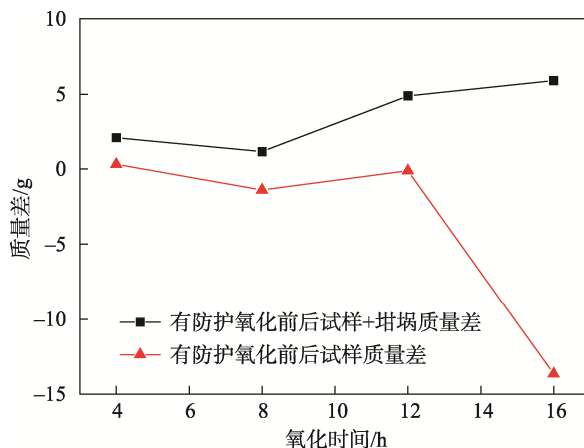


图3 有涂层块状试样在 1 280 °C 下氧化前后质量变化曲线

Fig.3 Mass change curves of coated bulk specimens before and after oxidation at 1 280 °C

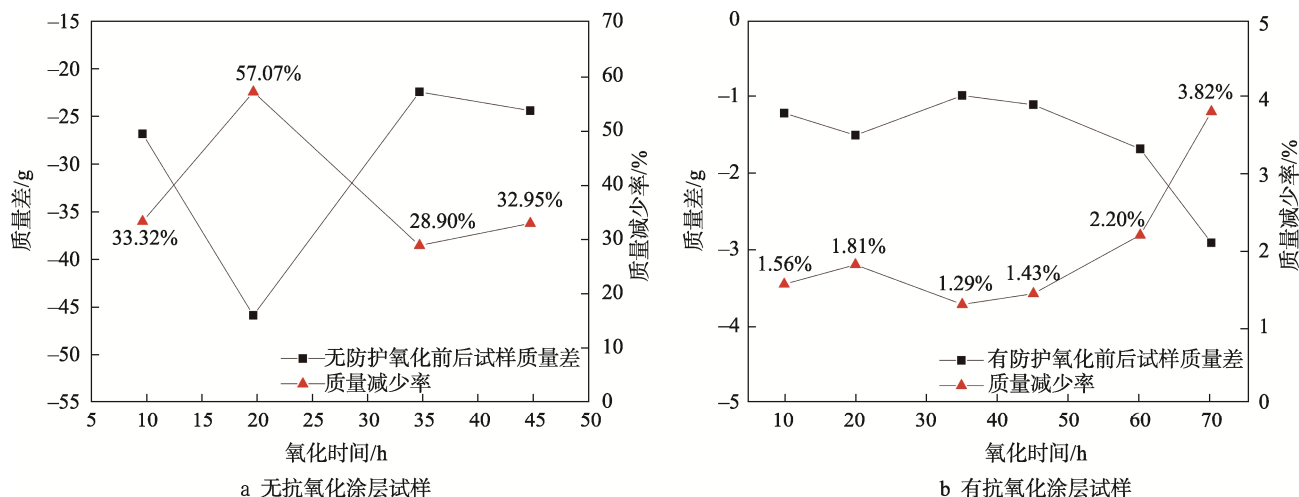


图 4 块状试样在 1220 °C 下的高温氧化减量曲线

Fig.4 High-temperature oxidation loss curves of the bulk specimens at 1220 °C

在 1250 °C 及 1280 °C 下, 有无抗氧化涂层试样的减量曲线分别见图 5 和图 6。在 1250 °C 下, 随着退火时间由 10 h 延长至 45 h, 无抗氧化涂层试样的质量减少率从 31.33% 增加至 86.39%, 氧化脱落现象极其严重。对于有抗氧化的涂层试样, 在退火时间 10~70 h 内, 质量减少率仅由 0.80% 提高至 9.45%, 氧化脱落行为被限定在较小的程度内。在 1280 °C 下无抗氧化涂层试样的氧化减量速率与 1250 °C 下的情况接近, 在 4~16 h 退火时间内, 质量减少率由 11.80% 提高至 48.82%; 而在相同退火时间内, 有抗氧化涂层试样的质量减少率变化范围为 0.36%~16.87%, 质量减少程度显著降低。

从上述结果可以看出, 对无抗氧化涂层试样来说, 1250 °C 和 1280 °C 下的氧化速率较接近, 1220 °C 下的氧化速率明显降低。当热处理温度为 1220 °C 时, 抗氧化涂层在较长时间内均显示出优良的防护效果; 在 1250 °C 下, 抗氧化涂层在退火 60 h 以内有很好的

防护效果, 一旦退火时间延长, 防护效果明显下降; 当热处理温度为 1280 °C, 退火时间在 12 h 以内时, 涂层对试样有较好的防护效果, 退火时间超过 16 h, 防护效果显著降低。

需要说明的是, 由于块状试样的质量大约为 80 g, 与实际生产中进行热处理的大型钢锭相比质量基数过小, 因此, 上述实验的质量减少率数值仅起到评价抗氧化涂层防护效果的作用, 无法预测实际热处理过程中的钢锭质量烧损过程。

2.3 高温氧化层厚度变化规律

为了定量评价高温氧化对于 S31254 超级奥氏体不锈钢钢锭的烧损速率, 选取边长为 20 mm 的立方块状试样, 在试样的 5 个面上均匀涂覆前述抗氧化涂层, 余留 1 个面不涂覆作为氧化速率考察面。抗氧化涂层类型及涂覆过程与前一部分实验一致。

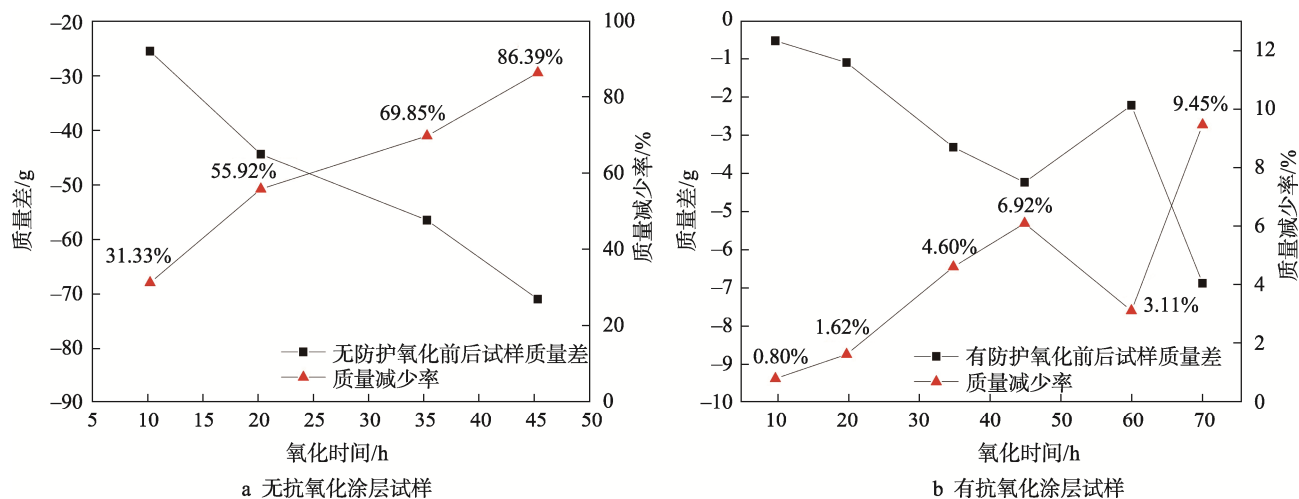


图 5 块状试样在 1250 °C 下的高温氧化减量曲线

Fig.5 High-temperature oxidation loss curves of the bulk specimens at 1250 °C

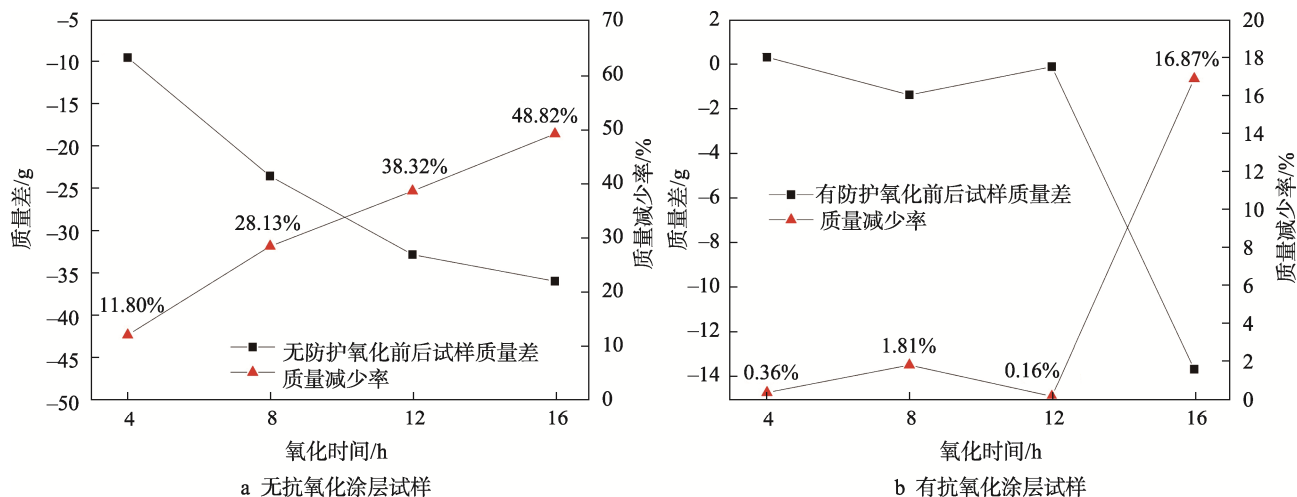


图 6 块状试样在 1 280 °C 下的高温氧化减量曲线

Fig.6 High-temperature oxidation loss curves of the bulk specimens at 1 280 °C

根据前述实验结果可知,加热温度为 1 220 °C 时,试样的氧化烧损速率较低,因此本实验选择在该温度下进行。将各试样非涂覆面向上放置在 $\phi 40\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 规格坩埚中,置于高温箱式电阻炉中进行加热氧化,退火时间依次为 10、20、35、45 和 60 h,随后取出空冷至室温,称量并测量厚度(机械去除表层氧化产物后),最终结果均为 5 次测量数值的平均值。

图 7 为在 1 220 °C 下退火 60 h 并去除表层氧化产物后试样纵截面的 SEM 照片。可以看出,在高温氧化后,试样表面除了会生成疏松氧化层外,还会在紧贴基体的表面形成一层致密的内氧化层,其组成主要为 Cr 和 Fe 的氧化物。钢铁材料表面氧化层的存在会影响后续的热加工性能,则在进入下一工序前需要打磨去除。在本实验中将内氧化层厚度也计算入氧化损失厚度之内。

基于上述实验结果,计算 1 220 °C 下退火不同时间后的试样烧损率,实验结果列于表 2。试样单面烧损速率在不同试样中表现出较好的一致性,平均单面烧损速率约为 $4.0\text{ }\mu\text{m/h}$ 。试样的总烧损率随退火时间的延长逐渐增加,当退火 60 h 以后,烧损率达到了 7.69%。需要强调的是,该烧损率的计算仅考虑未涂覆抗氧化剂表面法向方向的厚度变化,而其余方向上的厚度变化则不予考虑。通过本次实验结果可以看出,该条件下得到的烧损率数值接近实际生产中的水平,具备一定的定量分析预测能力。

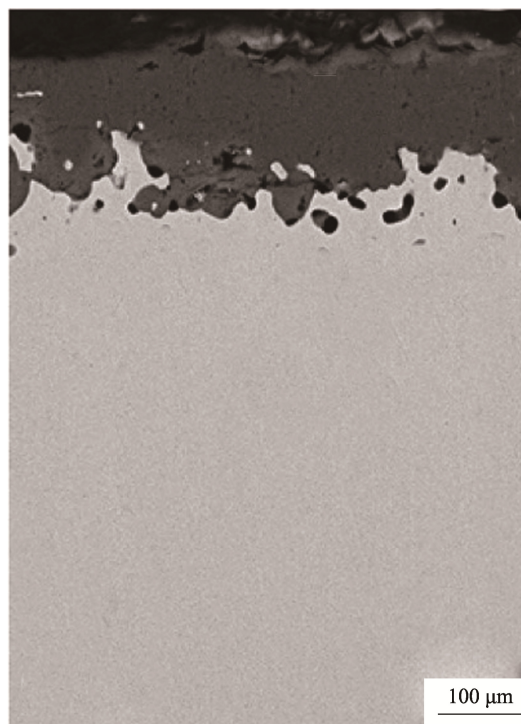


图 7 1 220 °C 下退火 60 h 后 S31254 超级奥氏体不锈钢试样表面形成的内氧化层形貌

Fig.7 Morphology of the inner oxide layer formed on the surface of S31254 super austenitic stainless steel specimen after annealing at 1 220 °C for 60 h

表 2 S31254 超级奥氏体不锈钢单面未防护烧损速度测定结果

Tab.2 Measurement results of oxidation loss rate of single-sided unprotected S31254 super austenitic stainless steel

编号	质量/g	退火时间/h	氧化前厚度/mm	氧化后厚度/mm	单面烧损速率/ $(\mu\text{m} \cdot \text{h}^{-1})$	总烧损率/%
1 [#]	79.81	10	20.08	20.04	4.0	1.19
2 [#]	82.38	20	20.19	20.10	4.5	2.67
3 [#]	71.08	35	20.10	19.98	3.4	3.58
4 [#]	73.30	45	20.13	19.95	4.0	5.37
5 [#]	73.61	60	20.28	20.02	4.3	7.69

取所有表面均涂覆抗氧化涂层的试样在 1 220 ℃ 下退火不同时间后进行厚度测量, 并计算相应的单面烧损速率及总烧损率, 结果列于表 3 中。可以看出, 涂覆抗氧化剂后, 试样的单面烧损速率为 3.2 μm/h 左右, 较未涂覆抗氧化剂试样的单面烧损速率降低了 20%。试样的总烧损率在各阶段均明显降低, 当退火时间为 60 h 时, 总烧损率降低至 5.32%, 较未涂覆抗氧化剂试样总烧损率降低了 31%。由此可知, 抗氧化涂层对 S31254 超级奥氏体不锈钢的高温氧化烧损具有明显的改善作用。

2.4 高温氧化层的组成

S31254 超级奥氏体不锈钢试样在 1 220 ℃ 下退火 10 h 后的纵截面氧化层显微组织分布情况如图 8 所示。可以看出, 试样的氧化层总体上可以分为内、外 2 层。该退火条件下的内氧化层厚度约为 550 ~ 600 μm,

外氧化层厚度在 350 μm 左右。内外氧化层间以及内氧化层内部存在缝隙。根据内氧化层的 EDS 分析结果可知 (图 8b), 其成分主要是 Fe、Cr 的氧化物, 与图 7 中的氧化层元素组成一致。在不锈钢各类氧化产物中, Cr₂O₃ 的致密性较好, 可以起到阻碍元素扩散的作用, 因此, 在一定程度上能够延缓氧化层的增厚。内氧化层中的合金元素除 Cr 之外还包括 Fe 元素, 说明此时试样已发生了失稳氧化, 即 Cr₂O₃ 层的完整性已破坏而不能起到防护作用。已有研究结果证明, 不锈钢中的 Cr、Si 元素在高温条件下会优先发生氧化并形成 Cr₂O₃、SiO₂ 保护膜。Fe 离子在 Cr₂O₃、SiO₂ 中的扩散系数非常小, 因此, Fe 离子的外扩散被阻止, 基体氧化速率减慢。然而, 当 Cr₂O₃ 层被破坏后, 这种保护效果减弱, 内部活泼 Fe 原子向外扩散的同时与穿透氧化层向内扩散的 O 原子结合形成了 Fe 的氧化物^[14-15]。Cr₂O₃ 层的失稳破坏可能是 Mo 的氧化物

表 3 S31254 超级奥氏体不锈钢防护后烧损速度测定结果
Tab.3 Measurement results of oxidation loss rate of coating-protected S31254 super austenitic stainless steel

编号	质量/g	退火时间/h	氧化前厚度/mm	氧化后厚度/mm	单面烧损速率/(μm·h ⁻¹)	总烧损率/%
6 [#]	77.14	10	20.12	20.12	0	0
7 [#]	75.93	20	20.10	20.03	3.5	2.09
8 [#]	75.16	35	19.96	19.85	3.1	3.31
9 [#]	76.11	45	20.18	20.03	3.3	4.46
10 [#]	75.89	60	20.30	20.12	3.0	5.32

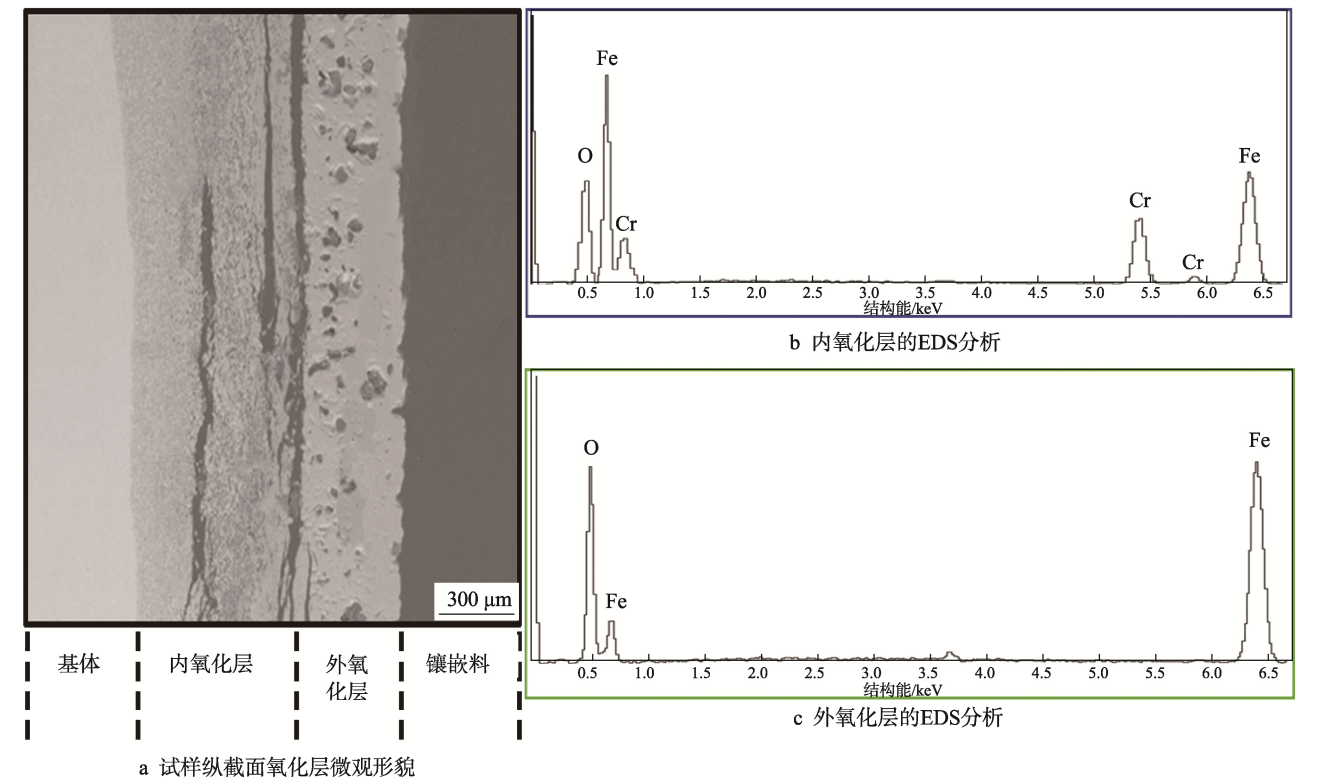


图 8 S31254 超级奥氏体不锈钢在 1 220℃ 下退火 10 h 后的氧化层分布情况
Fig.8 Distribution of the oxide layer of S31254 super austenitic stainless steel after annealing at 1220 °C for 10 h

气化所造成的。Yun 等^[16]研究了 Mo 元素对 Fe-22Cr-0.5Mn 铁素体不锈钢氧化性能的影响,发现 Mo 的挥发物会破坏 Cr₂O₃ 氧化膜的保护性。Perez 等^[17]研究了 304 不锈钢中离子注入 Mo 对氧化性能的影响,结果显示,Mo 的氧化产物 MoO₃ 挥发之后能够破坏致密 Cr₂O₃ 氧化膜的保护效果,显著提高不锈钢的氧化速率。外层氧化物的 EDS 结果(图 8c)证明其成分基本为 Fe 的氧化物。这说明在氧化过程中,Fe 原子迅速向外扩散,不断形成的 Fe 氧化物层逐渐覆盖原先形成的 Cr、Fe 氧化物层,最终形成了完整的、结构疏松的外氧化层。需要指出的是,内外氧化层之间的缝隙以及外氧化层的孔洞为基体中的 Mo 元素扩散提供了良好的通路,导致在高温退火过程中 Mo 的氧化物不断生成并气化,造成了严重的氧化烧损。

3 结语

S31254 超级奥氏体不锈钢在 1 150~1 250 °C 下的高温氧化增量曲线符合抛物性规律,但当温度达到 1 300 °C 时,氧化增量曲线已接近线性规律,氧化层增长速率急剧增加。

抗氧化涂层能够显著降低 S31254 超级奥氏体不锈钢在 1 220~1 280 °C 下的氧化速率;当退火温度为 1 220 °C 时,试样在空气中的平均单面烧损速率约为 4.0 μm/h,而使用抗氧化涂层后,平均单面烧损速率降至 3.2 μm/h;退火 60 h 内,使用涂层能使钢锭的烧损率降低 31% 左右。

S31254 超级奥氏体不锈钢在 1 220 °C 下退火 10 h 后,氧化层可分为内外 2 层。内氧化层主要是 Fe、Cr 的氧化物;基体 Fe 原子在退火过程中迅速向外扩散,不断形成的 Fe 氧化物层逐渐覆盖原先形成的 Cr、Fe 氧化物层,最终形成了完整的、结构疏松的外氧化层。

参考文献:

- [1] 刘勇,陈海涛,刘润芳,等.弹药金属包装材料的腐蚀与防护综述[J].包装工程,2020,41(9):232-237.
LIU Yong, CHEN Hai-tao, LIU Run-fang, et al. Review of Corrosion and Anti-Corrosion of Ammunition Metal Packaging Materials[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(9): 232-237.
- [2] 张亚彬,任建斌,王锦永,等. S31254 超级奥氏体不锈钢析出相演变及微观表征[J]. 中国冶金, 2021, 31(12): 61-66.
ZHANG Ya-bin, REN Jian-bin, WANG Jin-yong, et al. Evolution and Microstructure Characterization of Precipitate Phases in S31254 Super Austenitic Stainless Steel[J]. China Metallurgy, 2021, 31(12): 61-66.
- [3] LI Yu-nong, ZOU De-ning, CHEN Wan-wan, et al. Effect of Cooling Rate on Solidification and Segregation Characteristics of 904L Super Austenitic Stainless Steel[J]. Metals and Materials International, 2021, 28(8): 1907-1918.
- [4] 赵振铎,白晋钢,韩培德,等.超级奥氏体不锈钢 254SMo 的高温析出相研究[J].热加工工艺,2011,40(16):62-65.
ZHAO Zhen-duo, BAI Jin-gang, HAN Pei-de, et al. Study on High Temperature Precipitation Phase of Super Austenitic Stainless Steel 254SMo[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(16): 62-65.
- [5] ZHANG Shu-cai, LI Hua-bing, JIANG Zhou-hua, et al. Influence of N on Precipitation Behavior, Associated Corrosion and Mechanical Properties of Super Austenitic Stainless Steel S32654[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 42: 143-155.
- [6] 张彬彬.超级奥氏体不锈钢 S32654 高温氧化机制及均匀化工艺研究[D].沈阳:东北大学,2015:23-36.
ZHANG Bin-bin. Research on High Temperature Oxidation Mechanism and Homogenization Treatment of Super Austenitic Stainless Steel S32654[D]. Shen Yang: Northeastern University, 2015: 23-36.
- [7] DONG Nan, ZHANG Cai-li, LI Hua-bing, et al. A Combined Experimental and First-Principle Study on the Oxidation Mechanism of Super Austenitic Stainless Steel S32654 at 900 °C[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 871.
- [8] LI Hua-bing, ZHANG Bin-bin, JIANG Zhou-hua, et al. A New Insight into High-temperature Oxidation Mechanism of Super-austenitic Stainless Steel S32654 in Air[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 686: 326-338.
- [9] 陈启超,游程超,范晓明,等. GX40CrNiSi25-20 奥氏体不锈钢的高温氧化性能研究[J]. 中国铸造装备与技术, 2019, 54(2): 9-14.
CHEN Qi-chao, YOU Cheng-chao, FAN Xiao-ming, et al. Study on High Temperature Oxidation Properties of GX40CrNiSi25-20 Austenitic Stainless Steel[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2019, 54(2): 9-14.
- [10] 焦军红,李鑫,刘振宇.稀土 Ce 对 310S 奥氏体耐热不锈钢高温氧化行为的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(1): 120-124.
JIAO Jun-hong, LI Xin, LIU Zhen-yu. Effect of Rare Earth Ce on High Temperature Oxidation Behavior of 310S Austenitic Heat-Resistant Stainless Steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(1): 120-124.
- [11] SINGH D, CEMIN F, JIMENEZ M, et al. High-tem-

- perature Oxidation Behaviour of Nanostructure Surface Layered Austenitic Stainless Steel[J]. Applied Surface Science, 2022, 581: 152437.
- [12] LIU Yi-peng, ZHONG Ning, SUN Yang-ting, et al. Effect of Short Term Aging on Microstructure Evolution, Pitting and Intergranular Corrosion Behaviour of UNS31254[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2016, 11(5): 3908-3920.
- [13] 徐有容, 陈良生, 王德英, 等. 高钼不锈钢热变形软化行为及微观组织研究[J]. 钢铁, 2000, 35(10): 51-54. XU You-rong, CHEN Liang-sheng, WANG De-ying, et al. Investigation of Softening Behavior and Microstructure Change under Hot Deformation for High Mo Stainless Steel[J]. Iron & Steel, 2000, 35(10): 51-54.
- [14] 龙剑平, 胤驰, 邓苗, 等. Cr₁₈Ni₉Ti 高温氧化行为研究[J]. 热加工工艺, 2008, 37(18): 1-3. LONG Jian-ping, YIN Chi, DENG Miao, et al. Study on High Temperature Oxidation Behavior of 1Cr₁₈Ni₉Ti Heat-Resistant Stainless Steel[J]. Hot Working Technology, 2008, 37(18): 1-3.
- [15] SINGH M K, KUMAR S, SINHA O P, et al. Cyclic Oxidation Behavior of the Super Austenitic Stainless Steel 904L in Air at 500-650 degrees C[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2020, 73(4): 1101-1108.
- [16] YUN D W, SEO H S, JUN J H, et al. Molybdenum Effect on Oxidation Resistance and Electric Conduction of Ferritic Stainless Steel for SOFC Interconnect[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(13): 10328-10336.
- [17] PEREZ F J, OTERO E, HIERRO M P, et al. High Temperature Corrosion Protection of Austenitic AISI 304 Stainless Steel by Si, Mo and Ce Ion Implantation[J]. Surface and Coatings Technology, 1998, 108: 127-131.

责任编辑: 曾钰婵