

铝合金表面氧化层在燃烧气氛中的退化行为

谢冬柏^{1,2}, 洪昊³, 多树旺³, 王文⁴

(1.南通理工学院 机械工程学院, 江苏 南通 226002; 2.南昌航空大学 材料科学与工程学院, 南昌 330063; 3.江西科技师范大学 江西省材料表面工程重点实验室, 南昌 330013; 4.中国科学院金属研究所, 沈阳 110016)

摘要: **目的** 通过对 300、400、500 °C 热空气和燃烧气氛中 5052 铝合金表面氧化层退化行为的分析, 研究基于火灾后金属材料表面产物分析来确定火场中是否存在助燃剂的方法。**方法** 使用高温氧化实验装置对火场中的燃烧气氛进行模拟, 用光学显微镜、扫描电子显微镜 (SEM)、X 射线衍射仪 (XRD) 和精密分析天平对 5052 铝合金在 300、400、500 °C 空气和燃烧气氛中表面氧化物的退化行为进行研究, 并对氧化物层的组织结构进行分析。**结果** 5052 铝合金表面氧化物层与外界环境气氛和温度密切相关, 在温度较低的热空气中表现出较好的抗氧化性能, 表面生成的氧化物层完整致密; 高温燃烧气氛使 5052 铝合金的氧化速度显著提高, 表面生成的氧化物层结构疏松, 并随时间的延长出现失稳氧化。**结论** 火灾中铝合金表面氧化层的微观结构记录了火场的相关信息, 这些信息不但是对传统残留物宏观形貌证据的有效补充, 还可作为火场中是否有助燃剂存在的辅助证据使用。

关键词: 氧化物; 火灾调查; 铝合金; 退化; 燃烧气氛; 高温氧化

中图分类号: TG146.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)01-0079-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.01.010

Degradation of Oxide on Surface of Al-Mg Alloy in Combustion Atmospheres

XIE Dong-bai^{1,2}, HONG Hao³, DUO Shu-wang³, WANG Wen⁴

(1.School of Mechanical Engineering, Nantong Institute of Technology, Nantong 226002, China; 2.School of Material Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 3.Jiangxi Key Laboratory of Surface Engineering, Jiangxi Science and Technology Normal University, Nanchang 330013, China; 4.Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the degradation of oxide scale on 5052 aluminum alloy in the hot air and combustion atmosphere of 300 °C, 400 °C and 500 °C, so as to study the method of determining whether there is accelerant in the fire scene based on the analysis of metal oxide scale after the fire. The combustion atmosphere in the fire scene was simulated by a high temperature oxidation experimental device. Optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD) and precision electronic balance were used to investigate the degradation of oxide scale on the surface of 5052 aluminum alloy in the air and combustion atmosphere of 300 °C, 400 °C and 500 °C and analyze the microstructure.

收稿日期: 2019-11-30; 修订日期: 2020-01-12

Received: 2019-11-30; Revised: 2020-01-12

基金项目: 痕迹检验鉴定技术公安部重点实验室资助项目 (2018121705); 江西省材料表面工程重点实验室资助项目 (KFGJ19009)

Fund: Supported by the Key Laboratory of Impression Evidence Examination and Identification Technology, Ministry of Public Security, People's Republic of China (2018121705); Open-fund Project of Jiangxi Key Laboratory of Materials Surface Engineering (KFGJ19009)

作者简介: 谢冬柏 (1973—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为高温氧化。邮箱: dbxie@aliyun.com

Biography: XIE Dong-bai (1973—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: high temperature oxidation. E-mail: dbxie@aliyun.com

The oxide scale on the surface of 5052 aluminum alloy was closely related to the ambient atmosphere and temperature. Good oxidation resistance appeared in hot air with lower temperature, and the oxide scale generated on the surface was complete and compact. The oxidation rate of 5052 aluminum alloy was significantly increased by high temperature combustion atmosphere. The structure of oxide scale formed on the surface was loose and unstable oxidation occurred with time. The microstructure of oxide scale on aluminum alloy surface in fire records relevant information of fire scene, which is not only an effective supplement to macroscopic morphology evidence of traditional residue, but also can be used as auxiliary evidence for the presence of combustion improver in fire scene.

KEY WORDS: oxide; fire investigations; aluminum alloy; degradation; combustion atmospheres; high temperature oxidation

火灾现场是否曾有助燃剂是确定放火案件的关键,但助燃剂在火场中不但难以寻找,还会受到高温氧化、物品燃烧、消防射水及救火过程中人员对现场破坏的干扰和污染^[1]。虽然有时也可通过对保存环境相对较好、燃烧形成烟尘的分析来确定助燃剂的存在,但此类烟尘即使暴露在室温条件下的空气中,成分也会发生明显改变,显著影响检测结果的准确性和可靠性^[2,3]。火场是一个高温氧化环境,如其中有助燃剂(如汽油、煤油等),燃烧后会形成以 CO_2 、 CO 、 H_2O 、 SO_2 、 NO_x (氮氧化物)、 PO_x (磷氧化物)等为主的气氛^[4],金属在火场中可与上述气氛发生固-气反应,这一过程中表面生成的氧化物种类、形貌和生长速率与气氛组成密切相关^[5-7]。之前的研究结果已表明:铜及普通碳素结构钢在煤油燃烧气氛中的高温氧化行为与空气中有显著差别^[8-12]。

铝合金是一种广泛使用的金属材料,常出现在火灾现场,可以预计其表面的氧化物层可能会留有火场气氛的相关信息。本文研究了5052铝合金在300、400、500℃空气和煤油燃烧气氛中表面氧化物的退化行为,并对其高温氧化性能变化的原因进行了讨论。意图通过对比热空气和模拟燃烧气氛中铝合金表面氧化层退化行为,并结合已有的研究成果,发展出一种通过对火灾后金属材料表面产物的分析来确定火场中是否存在助燃剂的方法。

1 实验方法

所用材料为铸态5052铝合金,成分如表1所示。首先用线切割将原材料加工成20 mm×10 mm×3 mm的片状样品,顶端打孔,表面经1000#SiC水砂纸打磨后,再用丙酮和无水乙醇进行超声波清洗,最后取出吹干。

高温氧化实验所用装置如图1所示,箭头所示方向为燃烧气氛的流动方向。该装置主体是两台可分别控温的水平三段炉,用一根石英管连通,所有样品置于石英管中控温热电偶附近。进行燃烧气氛实验时,煤油注入燃烧室的速度为2.6 mL/min,同时通入流速为20 mL/min的空气,混合后点燃,燃烧气氛通过石英管进入反应炉,并在其中与样品接触反应。当反应炉中的样品达到设定温度即开始计时,实验温度分别取300、400、500℃,每15 min取出,空冷至室温,

待样品表面氧化层自然剥落结束后称重。进行热空气高温氧化实验时,反应炉中的气氛为空气。在石英管尾部采集用于分析燃烧气氛的气体样本,所用气体采样袋为Teflon®FEP,采集的气体样本用Gasmeter FTIR gas analyser DX4045傅里叶红外气体分析仪进行分析,气氛的分析结果如表2所示。

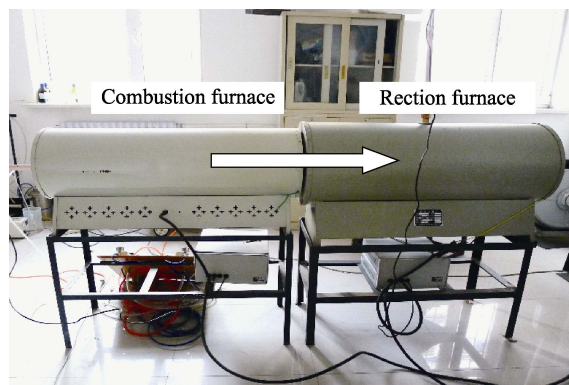


图1 高温氧化实验装置

Fig.1 High-temperature oxidation experiment device

表1 5052铝合金化学成分

Tab.1 Chemical composition of 5052 aluminum alloy wt%

Mg	Si	Cu	Cr	Fe	Mn	Zn	Bal.
2.2	0.25	0.10	0.1	0.40	0.10	0.0084	Al

表2 燃烧气氛的主要成分

Tab.2 Main components of air-kerosene combustion atmospheres at%

Compound	H_2O	CO_2	SO_2	CO
Result	1.39	1.93	0.0009	0.115

使用Zeiss Sigma场发射扫描电镜(SEM)及自带的Oxford INCA能谱和Shimadzu XRD-6100 X射线衍射仪对表面氧化层的形貌和结构进行分析。

2 实验结果

2.1 动力学曲线

图2为样品分别在300、400、500℃空气和燃烧气氛中的氧化动力学曲线,由图可知,5052铝合

金在热空气和燃烧气氛中的氧化动力学曲线均可分为两个主要阶段。第一阶段为氧化的前 30 min, 此时所有实验温度条件下合金的氧化增重率并没有明显变化, 而随时间延长, 在 30 min 后的第二阶段均出现了失稳氧化。随温度的升高, 这种样品在氧化后期增重率增加的现象更加明显。与热空气相比, 燃烧气氛中 5052 铝合金氧化增重率的升高速度也有显著增加。氧化的前 30 min 内, 增重率低于 0.1 mg/cm^2 ; 氧化 15 min 的增重率比 30 min 时提高了 10 倍以上。在两种气氛中, 样品的增重率均随温度的升高而增大, 这是由于温度的升高使环境中的活泼气体分子和样品中金属离子的内能增加, 其在表面氧化膜中的扩散速率升高, 氧化物的生长加速。

2.2 微观形貌

将样品从炉内取出后, 肉眼及光学显微镜观察时, 表面氧化物层均未见明显剥落, 仅部分表面有银灰色氧化物生成。图 3 为样品在 300°C 时氧化后的表面形貌, 可见在空气中氧化 30 min 后, 样品基本保持原始状态, 肉眼可见表面失去金属光泽。燃烧气氛中, 样品表面氧化层的保护能力下降, 但在较低温度时, 这一影响并不明显, 仅有少量银灰色氧化物出现在局部基体表面, 经原位高倍放大观察可发现, 在高温燃烧气氛中, 样品表面生成的氧化层较粗糙, 但由于此时氧化层较薄, 在 SEM 下仍能观察到制备时所留划痕。

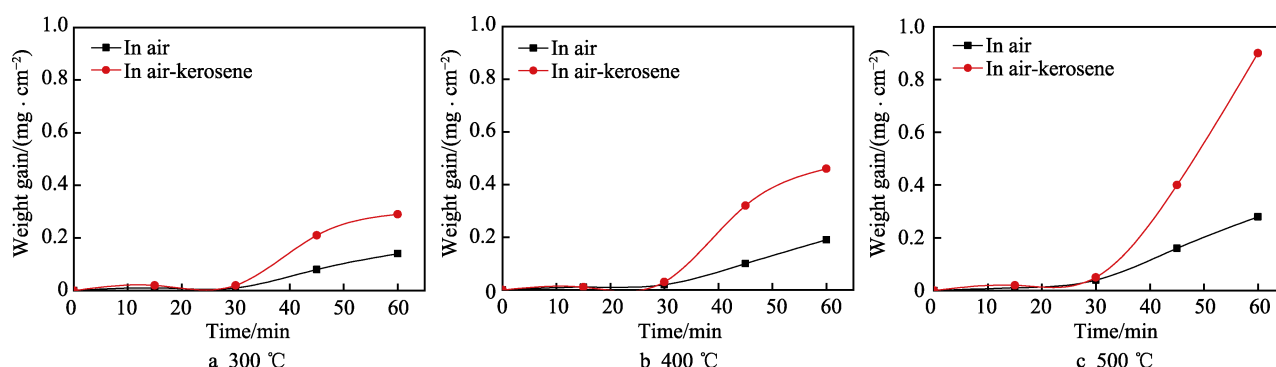


图 2 5052 铝合金在空气和燃烧气氛中的氧化动力学曲线

Fig.2 Oxidation kinetics of 5052 aluminum alloy in air and kerosene-air combustion atmosphere

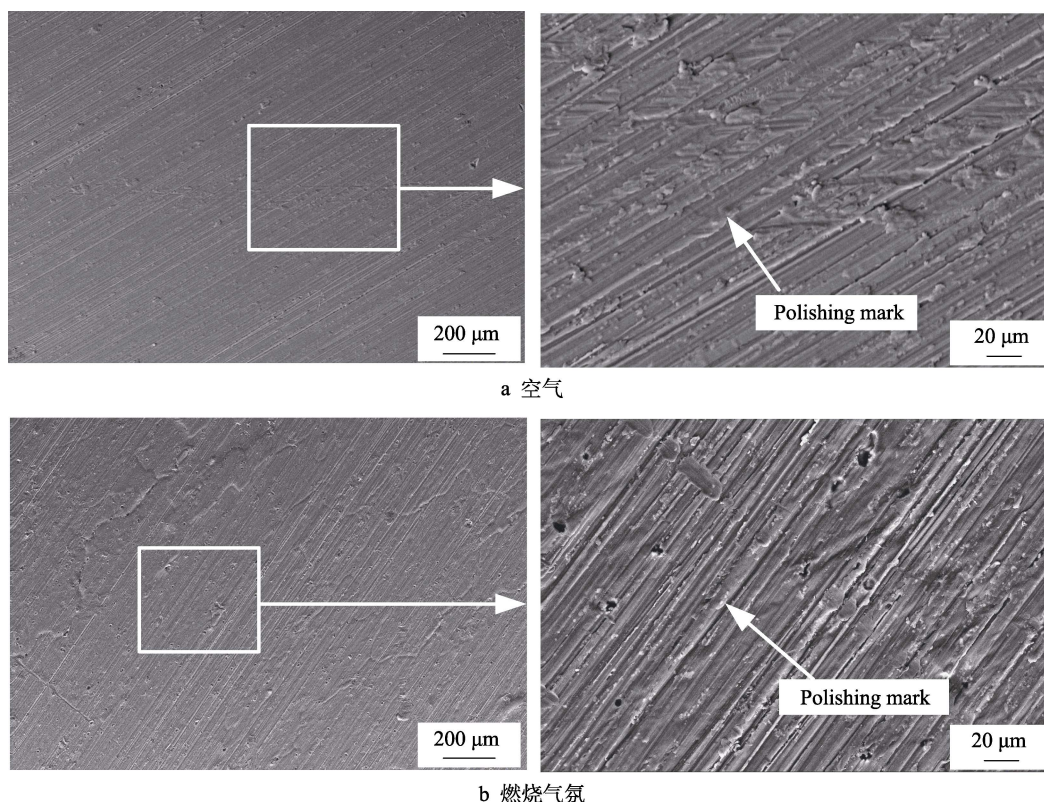


图 3 5052 铝合金在 300°C 空气和燃烧气氛中氧化 30 min 后表面 SEM 形貌
Fig.3 SEM surface morphologies of the 5052 aluminum alloy after oxidation in air (a) and kerosene-air combustion atmosphere (b) at 300°C for 30 min

图4为样品在400℃氧化后的表面形貌。比较图3和图4可知,随着温度的升高,表面生成的氧化层粗糙度增加,局部出现剥落。对比图4a和图4b

可发现,燃烧气氛对表面形成的氧化膜有明显影响,氧化层中出现了瘤状氧化物,EDS分析结果表明这是Al和Mg的混合氧化物。

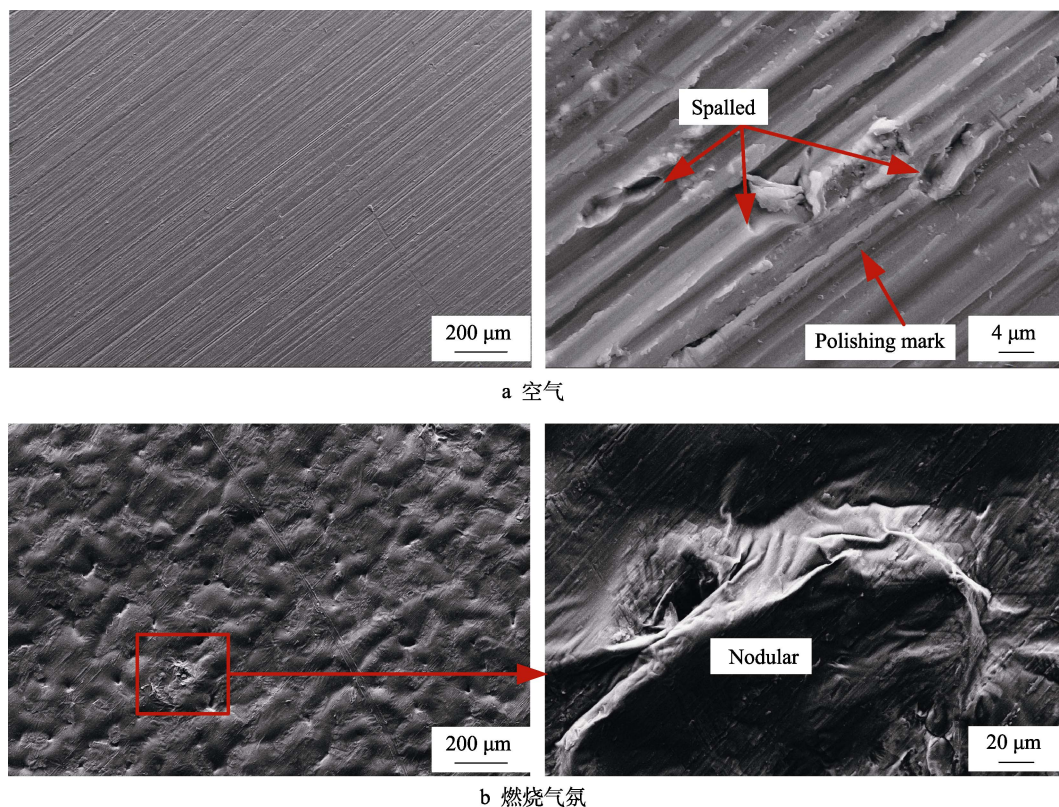


图4 5052铝合金在400℃空气和燃烧气氛中氧化30 min后表面SEM形貌
Fig.4 SEM surface morphologies of the 5052 aluminum alloy after oxidation in air (a) and kerosene-air combustion atmosphere (b) at 400℃ for 30 min

图5为样品在500℃氧化15 min的表面形貌。在高温环境中,氧化15 min的表面已出现了明显长大的氧化物颗粒,EDS分析结果表明生成的是以Al和Mg为主的混合氧化物,放大可观察到局部表面氧化膜出现了剥落。图6为样品在500℃氧化30 min的表面形貌,热空气中氧化30 min的样品肉眼观察即可见表面生成的银灰色氧化层,在高放大倍率下可发现氧化层的粗糙度进一步增大。随时间的延长,燃烧气氛中样品表面出现了瘤状氧化物(图6b),EDS分析结果表明其为富Al和Mg的混合氧化物。随温度的升高,瘤状氧化物的尺寸增大,在燃烧气氛中的增大速度更快。

图7为样品在不同气氛中氧化1 h后的截面SEM照片。5052铝合金中的Mg和Si,在高温下会发生选择性氧化。随温度的升高或时间的延长,表面生成的氧化层会增厚。从图7a可明显看到,500℃热空气中氧化1 h后,样品表面生成了连续的氧化层,局部可见裂纹,氧化层仅有轻微剥落,仍保持着较好的

粘附性。在燃烧气氛中,表面生成的氧化物层明显较厚(达到6 μm),是同温度热空气中生成氧化物层厚度的3倍左右,并且氧化物层中出现了明显的缺陷(图7b)。随氧化时间的延长,其中的缺陷数量增加,尺寸加大,从而导致氧化层失去保护作用,这与图2c中氧化动力学的第二阶段曲线一致。

2.3 氧化层的相结构

图8给出了5052铝合金分别在300、400、500℃空气和燃烧气氛中氧化1 h后的XRD图。由图可见,氧化1 h后,表面是由MgO、SiO₂和少量AlMg₂O₄组成的混合氧化物,此时仍能检测到较强的基体峰,这是由于表面生成的氧化物层较薄,其中的Al₂O₃层未能检出也是由于其较薄的原因。在燃烧气氛中,5052铝合金表面生成的氧化物相成分与空气中相比并没有显著差异,只是氧化物层中的缺陷增多(图7b),这导致了其对基体的保护能力下降,使后期的氧化加速。

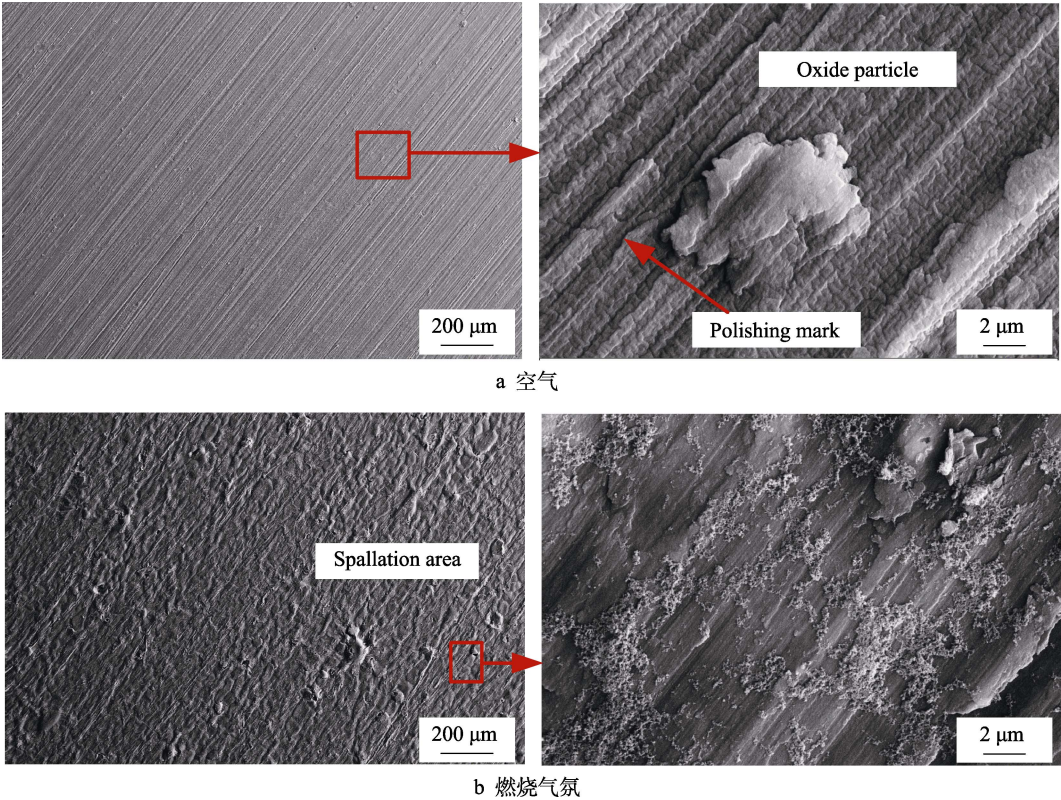


图 5 5052 铝合金在 500 ℃ 空气和燃烧气氛中氧化 15 min 后表面 SEM 形貌
Fig.5 SEM surface morphologies of the 5052 aluminum alloy after oxidation in air (a) and kerosene-air combustion atmosphere (b) at 500 ℃ for 15 min

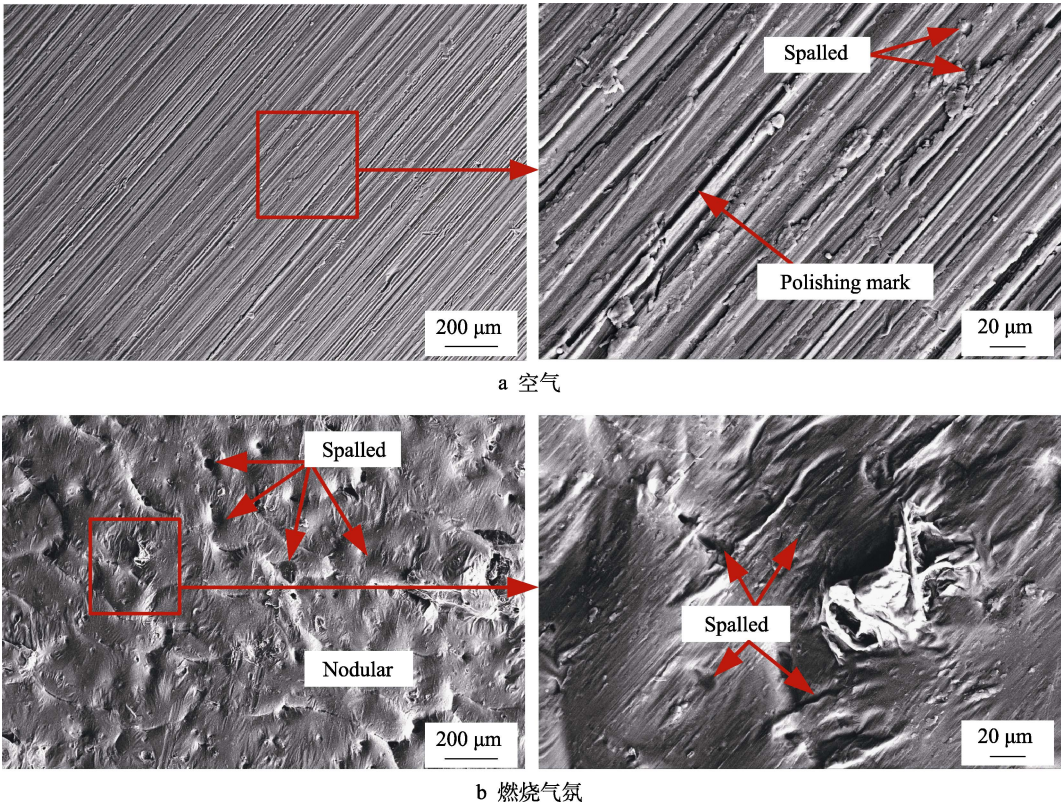


图 6 5052 铝合金在 500 ℃ 空气和燃烧气氛中氧化 30 min 后表面 SEM 形貌
Fig.6 SEM surface morphologies of the 5052 aluminum alloy after oxidation in air (a) and kerosene-air combustion atmosphere (b) at 500 ℃ for 30 min

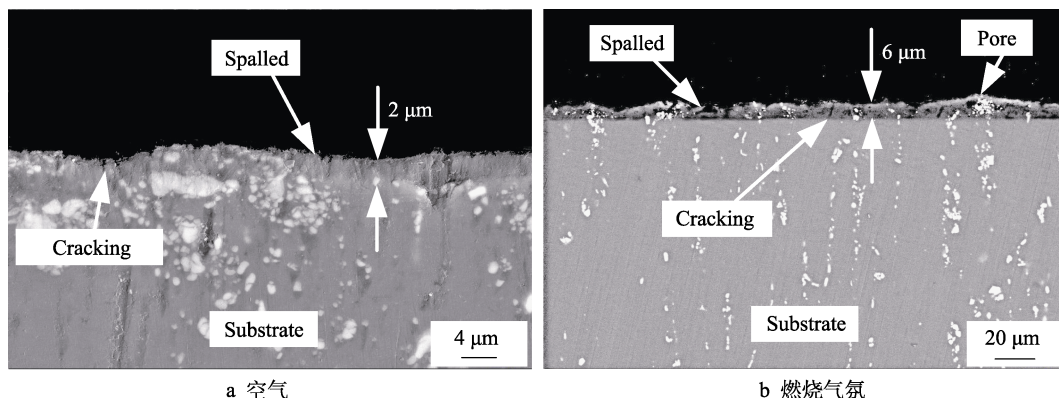


图7 5052铝合金在500℃空气和燃烧气氛中氧化1h后截面SEM形貌
Fig.7 SEM cross sectional morphologies of 5052 aluminum alloy after oxidation in air (a) and kerosene-air combustion atmosphere (b) at 500℃ for 1 h

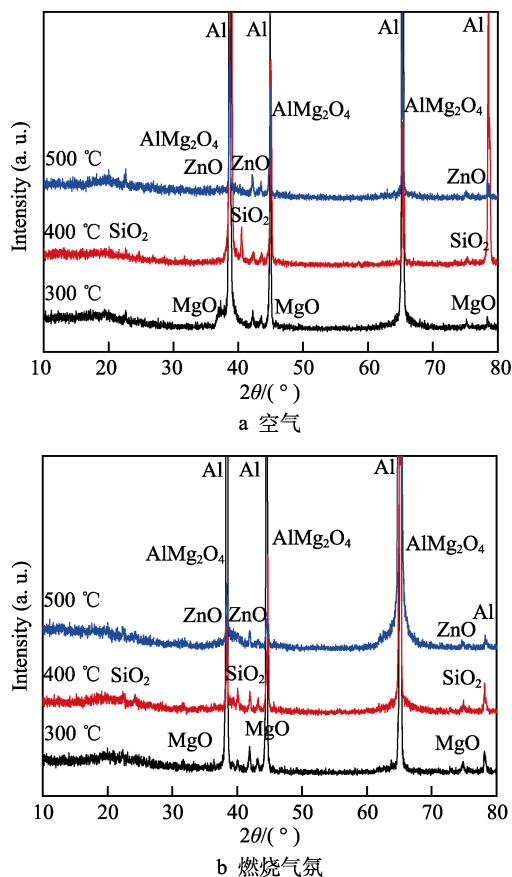


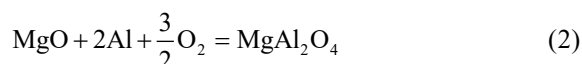
图8 5052铝合金在空气和燃烧气氛中氧化1h后的XRD图
Fig.8 XRD patterns of the oxides formed on 5052 aluminum alloy after oxidation in air (a) and kerosene-air combustion atmosphere (b) for 1 h

3 讨论

高温环境中的金属会与周围气氛发生固-气反应,活泼气体分子吸附在金属表面,并与之反应生成氧化物颗粒,这些氧化物颗粒能通过随后的形核和长大过程在其表面形成连续氧化膜^[13],氧化膜通过抑制

气体和金属离子的反应来实现对基体的保护。所生成氧化膜的种类、形貌和生长速率与合金成分、环境温度与介质组成密切相关。当5052铝合金氧化时间较短、环境温度较低时,表面生成的氧化膜较薄,肉眼观察可见表面失去金属光泽,但未出现肉眼可见的明显剥落,只在部分表面有银灰色的氧化物生成,基本保持原始状态,SEM可观察到样品表面制备时留下的划痕。氧化初期5052铝合金表面生成的 α - Al_2O_3 膜为内层非晶,外层为晶体的双层结构,其中非晶态的 α - Al_2O_3 膜在氧化初期就会在表面迅速生成^[14,15],它会成为周围环境气氛与基体合金之间的屏障,抑制氧化物的生成。

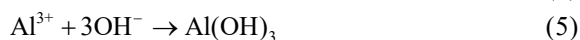
随温度的升高,5052铝合金的氧化加速,氧化增重率也增加。这是由于温度的升高使环境中 O^{2-} 与合金中 Al^{3+} 的活度增加, O^{2-} 向气/固界面的扩散加速,在穿过氧化初期形成的非晶态 α - Al_2O_3 膜后,在其下靠近基体处生成新的 Al_2O_3 。同时由于 Al_2O_3 的持续生长也会受到 Al^{3+} 在基体中扩散速度的影响,以上两个相互独立的扩散过程均会由于温度的升高而加速,使氧化增重率升高,表面形成的氧化膜粗糙度增加。表面形成氧化膜的厚度和离子在金属中的扩散速度,与合金中活泼元素的种类及成分密切相关。5052铝合金是Al-Mg系铝合金,Mg是此类合金中的主要添加元素,它可对合金起到固溶强化作用,但高温下,合金中的 Mg^{2+} 可向表面快速扩散并与空气中的O发生反应(1)。同时反应(1)中生成的MgO可与合金中的 Al^{3+} 由反应(2)生成 MgAl_2O_4 ,这两种氧化物均以颗粒形式存在,并由基体向外生长^[16],这会破坏合金表面之前生成的连续 Al_2O_3 层,从而使后续的氧化加速^[17]。



正是这一原因,5052铝合金在氧化30 min后,

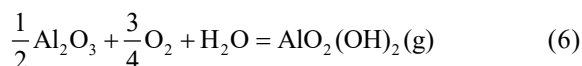
发生了灾难性氧化。反应 (1) — (2) 进行的速度与温度紧密相关, 随温度的升高, MgO 、 MgAl_2O_4 生成的速度也会加快。500 °C 空气中氧化 15 min, 金属表面已出现了长大的 MgO 和 MgAl_2O_4 混合氧化物颗粒; 400 °C 空气中氧化 30 min, 仅在样品局部表面出现氧化物颗粒的剥落; 300 °C 空气中氧化 30 min, 肉眼能观察到样品局部表面存在少量的银灰色氧化物, 使用 SEM 进行高倍率放大观察可见表面在制备过程中留下的划痕。

在燃烧气氛中, 铝合金 5052 表面出现明显缺陷, 从而降低了表面氧化层的保护性, 生成的氧化物层厚度显著增加。5052 铝合金在氧化初期形成的保护性 Al_2O_3 膜能阻碍金属离子向外及气体分子向内扩散。但燃烧气氛中存在的 H_2O (表 2), 在高温条件下可发生反应 (3) — (5) 的阴极去极化反应^[18-20]。

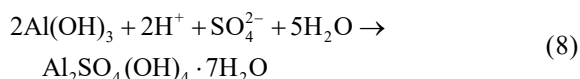
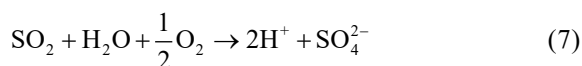


由于生成的 OH^- 半径 ($r=0.095 \text{ nm}$) 比 O^{2-} 半径 ($r=0.140 \text{ nm}$) 小, 反应 (3) 生成的 OH^- 扩散通过氧化膜的速度快, 这会加速反应 (5) 的进行, 从而使氧化膜的保护能力降低。同时反应 (3) 生成的 H_2 还会在后续生成的氧化膜内产生微裂纹, 使氧化层的结构疏松, 并出现较多的孔洞和缺陷, 这会进一步降低表面氧化膜的保护能力。同时, 氧化膜中的缺陷也利于 H_2 的扩散, 当在扩散过程中遇到上层氧化物层时, 层中局部相对致密的结构会阻止扩散的进行, 随时间的延长、温度的升高, 生成的 H_2 会在这一局部氧化层中不断聚集, 该处 H_2 的压力也会升高, 致使氧化膜最终在 H_2 压力的作用下发生开裂, 形成局部剥落^[21,22]。

表面 Al_2O_3 层还会与燃烧气氛中的 H_2O 发生反应 (6), 从而加速表面氧化层的破坏。



燃烧气氛中的 SO_2 和 H_2O 也会与 O_2 发生反应 (7), 反应 (5) 生成的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 还能与反应 (7) 中的产物发生反应 (8)。



反应 (6) 和反应 (8) 中生成的挥发性产物, 会使氧化物层的结构疏松, 层中的缺陷数量增加^[23,24], 这不但能加速合金表面 Al 的消耗, 还会阻碍表面生成 Al_2O_3 膜的连续性和完整性^[25,26]。同时, 随着合金中 Al 、 Mg 等元素的消耗, 表面出现局部的富 Zn 、 Si 区域, 在此区域更易生成 ZnO 、 SiO_2 等氧化物颗

粒, 这些细小的氧化物颗粒会降低氧化膜与基体合金的结合力, 加速氧化层的局部剥落, 进一步使其抗氧化性能降低。

4 结论

1) 在温度较低的热空气中氧化时, 铝合金表现出良好的抗氧化性能, 表面氧化层完整致密, 但在较高温度下出现 MgO 、 MgAl_2O_4 , 局部氧化膜有剥落现象。

2) 燃烧气氛中, 铝合金表面生成的氧化层结构变疏松, 内部缺陷增多, 氧化物颗粒的尺寸增大, 合金的抗氧化性能变差, 氧化速度明显增加。

3) 燃烧气氛中铝合金表面氧化物层的微观结构特征可作为火场中是否有助燃剂存在的辅助证据使用。

参考文献:

- [1] HUANG Ying, YANG Vigor. Dynamics and stability of lean-premixed swirl-stabilized combustion[J]. Progress in energy and combustion science, 2009, 35(4): 293-364.
- [2] 范子琳, 苏冰, 鲁志宝, 等. 气相色谱/多级离子阱技术分析汽油烟尘成分[J]. 消防科学与技术, 2011, 30(11): 1081-1085.
FAN Zi-lin, SU Bing, LU Zhi-bao, et al. Determination of components in gasoline and its soot by gas chromatography ion trap tandem mass spectrometry[J]. Fire science and technology, 2011, 30(11): 1081-1085.
- [3] WU Chia-hao, CHEN Chin-lien, HUANG Ching-te, et al. Identification of gasoline soot in suspect arson cases by using headspace solid phase microextraction-GC/MS[J]. Analytical letters, 2004, 37: 1373-1384.
- [4] YOON Jae-kun, THAKRE Piyush, YANG Vigor. Modeling of RDX/GAP/BTTN pseudo-propellant combustion[J]. Combustion and flame, 2006, 145(1/2): 300-315.
- [5] ROUILLARD F, MARTINELLI L. Corrosion of 9Cr steel in CO_2 at intermediate temperature III: Modelling and simulation of void-induced duplex oxide growth[J]. Oxidation of metals, 2012, 77(1/2): 74-83.
- [6] LAI Xue-jun, TANG Shuang, LI Hong-qiang, et al. Flame-retardant mechanism of a novel polymeric intumescent flame retardant containing caged bicyclic phosphate for polypropylene[J]. Polymer degradation and stability, 2015, 113: 22-31.
- [7] FEI Qi, ANDREW Mcilroy. Identifying combustion intermediates via tunable vacuum ultraviolet photoionization mass spectrometry[J]. Combustion science and technology, 2005, 177: 2021-2037.
- [8] 谢冬柏, 单国. 燃油火场环境中助燃剂的快速检验方

- 法研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2017, 37(1): 74-80.
- XIE Dong-bai, SHAN Guo. Rapid identification of liquid accelerant in fire scene environment[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2017, 37(1): 74-84.
- [9] 谢冬柏, 吾提克尔·吾守尔, 王震, 等. 煤油燃烧气氛对金属材料高温腐蚀行为的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2016, 28(6): 511-516.
- XIE Dong-bai, Wtkur Wushouer, WANG Zhen, et al. Effect of combustion adjuvants in fire scene environments on high temperature corrosion of carbon steel[J]. Corrosion science and protection technology, 2016, 28(6): 511-516.
- [10] 谢冬柏, 陈军, 王震, 等. 助燃剂火场环境中钢的高温腐蚀行为研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2017, 29(1): 15-20.
- XIE Dong-bai, CHEN Jun, WANG Zhen, et al. Effect of kerosene combustion atmosphere on corrosion of copper at high temperature[J]. Corrosion science and protection technology, 2017, 29(1): 15-20.
- [11] XIE Dong-bai, SHAN Guo, DENG Shi, et al. Investigations on oxidation and microstructure evolution of pure Cu exposed to air-kerosene combustion atmospheres[J]. Fire and materials, 2017, 41: 614-624.
- [12] XIE Dong-bai, SHAN Guo, LV Shi-lei. Oxidation behavior of carbon steel in simulated kerosene combustion atmosphere: A valuable tool for fire investigations[J]. Fire and materials, 2018, 42(2): 156-163.
- [13] ESSUMAN E, MEIER G-H, ZUREK J, et al. The effect of water vapor on selective oxidation of Fe-Cr alloys[J]. Oxidation of metals, 2008, 69(3/4): 143-162.
- [14] DOHERTY P E, DAVIS R S. Direct observation of the oxidation of aluminum single-crystal surfaces[J]. Journal of applied physics, 1963, 34(3): 619-628.
- [15] BECK A F, HEINE M A, CAULE E J, et al. The kinetics of oxidation of Al in oxygen at high temperature[J]. Corrosion science, 1967, 7(1): 1-22.
- [16] COCHRAN C N, SLEPPY W C. Oxidation of high-Purity aluminum and 5052 aluminum-magnesium alloy at elevated temperatures[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1961, 108(4): 322-327.
- [17] FIELD D J, SCAMANS G M, BUTLER E P. The high temperature oxidation of Al-4.2 wt pct Mg alloy[J]. Metallurgical transactions A, 1987, 18(3): 463-472.
- [18] 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(11): 3428-3454.
- [19] HENRY S, GALERIE A, ANTONI L. Abnormal oxidation of stabilized ferritic stainless steels in water vapor[J]. Materials science forum, 2001, 369-372: 353-360.
- [20] THOMLINSON L, CORY N-J. Hydrogen emission during the steam oxidation of ferritic steels: Kinetics and mechanism[J]. Corrosion science, 1989, 29(8): 939-965.
- [21] LI Chao, HUANG Tai-hong, SONG Peng, et al. Effect of water vapour on morphology of the Si/Ti-rich phase at the interface between oxide layer and aluminide coating[EB/OL]. [2019-9-24]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010938X19306407>.
- [22] JANAKIRAMAN R, MEIER G H, PETTIT F S. The effect of water vapor on the oxidation of alloys that develop alumina scales for protection[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1999, 30(11): 2905-2913.
- [23] MACHET A, GALTAYRIES A, ZANNA S, et al. XPS and STM study of the growth and structure of passive films in high temperature water on a nickel-base alloy[J]. Electrochimica acta, 2004, 49(22-23): 3957-3964.
- [24] HUCZKOWSKI P, OLSZEWSKI T, SCHIEK M, et al. Effect of SO₂ on oxidation of metallic materials in CO₂/H₂O-rich gases relevant to oxyfuel environments[J]. Materials and corrosion, 2014, 65(2): 121-131.
- [25] LANCE M J, UNOCIC K A, HAYNES J A, et al. Effect of water vapor on thermally-grown alumina scales on Pt-modified and simple aluminide bond coatings[J]. Surface and coatings technology, 2013, 237: 2-7.
- [26] UNOCIC K A, PINT B A. Effect of water vapor on thermally grown alumina scales on bond coatings[J]. Surface and coatings technology, 2013, 215: 30-38.