DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.5002

低氧环境下 FeNiCrAl 多主元合金动态铅铋腐蚀行为

王健斌[1],赵　可[2],王志军[1],刘小明[1],黄赟浩[2],李俊杰[1],王锦程[1]

(1. 西北工业大学 凝固技术全国重点实验室，陕西 西安 710072;2. 中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点研究室,四川 成都 610213)

摘　要:铅冷快堆作为第 IV 代核反应堆的推荐堆型,具有显著的先进性。然而,耐铅铋腐蚀结构材料一直是制约其发展的重要因素。已有研究表明 $Fe_{37}Ni_{36}Cr_{10}Al_{17}$ 多主元合金具有良好的静态铅铋相容性。基于此,以 $Fe_{37}Ni_{36}Cr_{10}Al_{17}$ 合金为对象,在含氧量为 10^{-7}%(质量分数)、流速为 2 m/s 的 550 ℃液态铅铋中暴露 2 000 h 以探究其动态腐蚀行为,为新型含 Al 金属材料在铅冷快堆中的应用提供研究基础。结果表明,Al 对氧化层的致密性和稳定性起决定性作用。当合金表面生成富 Al 氧化层时,合金能够得到很好保护;当氧化层中 Al 含量较低或分布不均时,合金会发生明显的溶解腐蚀。溶解腐蚀主要发生在 FCC 相中，导致 FCC 相中的 Ni 大量流失，并析出弥散的 B2 相。相比于传统商用不锈钢,$Fe_{37}Ni_{36}Cr_{10}Al_{17}$ 合金的溶解腐蚀深度较浅,具有明显的应用优势。

关键词:铅冷快堆;铅铋合金;动态腐蚀;FeNiCrAl 多主元合金

中图分类号:TG172　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2025)05-0464-07

Dynamic Lead-bismuth Corrosion Behavior of FeNiCrAl Multi-Principal Component Alloy in a Low-oxygen Environment

WANG Jianbin[1], ZHAO Ke[2], WANG Zhijun[1], LIU Xiaoming[1], HUANG Yunhao[2], LI Junjie[1], WANG Jincheng[1]

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Science and Technology on Reactor Fuel and Materials Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China)

Abstract: As the recommended reactor type for fourth-generation nuclear reactors, lead-cooled fast reactors have made remarkable progress. However, lead-bismuth corrosion-resistant structural materials have always been an important factor restricting their development. Previous studies have shown that $Fe_{37}Ni_{36}Cr_{10}Al_{17}$ multiprinciple component alloys have good static lead-bismuth compatibility. Therefore, with the $Fe_{37}Ni_{36}Cr_{10}Al_{17}$ alloy as the object, the dynamic corrosion behavior of a 550 ℃ liquid lead-bismuth eutectic with an oxygen content of 10^{-7} wt.% and a flow rate of 2 m/s was explored, providing a research basis for the application of new Al-containing metallic materials in lead-cooled fast reactors. These results indicate that Al plays a decisive role in the oxide layer. When the alloy indicates the formation of an Al-rich oxide layer, the alloy can be well protected; when the Al content in the oxide layer is low or unevenly distributed, the $Fe_{37}Ni_{36}Cr_{10}Al_{17}$ alloy undergoes significant dissolution corrosion. Dissolution corrosion mainly occurs in the FCC phase, causing a significant loss of Ni, a decrease in stability, and the precipitation of the dispersed B2 phase. Compared with traditional commercial stainless steel, the $Fe_{37}Ni_{36}Cr_{10}Al_{17}$ alloy has a shallower dissolution corrosion depth and significant application advantages.

Key words: lead-cooled fast reactor; lead-bismuth eutectic alloy; dynamic corrosion; FeNiCrAl multiprinciple component alloy

收稿日期:2025-01-08

基金项目:国家自然科学基金(52001299);中核集团基础科研项目(NPIC-z3012023004);中核集团青年英才(NPIC-k301007038)

作者简介:王健斌,1995 年生,博士生.研究方向为高熵合金抗腐蚀性能.Email: jbwangdaniel@mail.nwpu.edu.cn

通信作者:王志军,1984 年生,博士,教授.研究方向为高熵合金成分设计.Email: zhjwang@nwpu.edu.cn

引用格式:王健斌,赵可,王志军,刘小明,黄赟浩,李俊杰,王锦程.低氧环境下 FeNiCrAl 多主元合金动态铅铋腐蚀行为[J].铸造技术,2025,46(5):464-470.

WANG J B, ZHAO K, WANG Z J, LIU X M, HUANG Y H, LI J J, WANG J C. Dynamic lead-bismuth corrosion behavior of FeNiCrAl multi-principal component alloy in a low-oxygen environment[J]. Foundry Technology, 2025, 46(5): 464-470.

中国知网　https://www.cnki.net

在全球能源紧缺和环境污染的背景下,核能作为一种可调度和大规模应用的清洁能源受到重视。在 21 世纪初，第 IV 代核电站的设计与建造就已经提出。第 IV 代核电站在安全性、小型化、防核扩散、放射性废料后处理等方面都有显著优势[1]。液态铅铋共晶(liquid lead-bismuth eutectic, LBE)因其卓越的核物理和热工水力性能而被广泛认为是第 IV代铅冷快堆和加速器驱动系统的候选冷却剂,但其强烈的腐蚀作用对结构材料提出了新的挑战[2-3]。作为重要的候选材料,铁素体/马氏体钢[4-5]、奥氏体钢[6-7]和氧化物弥散强化合金[8-9]等传统结构材料的耐铅铋腐蚀性能在世界范围内得到了广泛研究。然而,结构钢仍然遭受严重的液态金属腐蚀,这严重威胁反应堆的运行安全。因此,开发液态铅铋环境中的耐腐蚀合金是铅冷快堆工业化应用之路上亟待解决的重要问题。

近几十年来,氧化铝形成奥氏体(alumina-forming austenitic, AFA)钢已显示出卓越的耐腐蚀性能和高温力学性能[10],其主要设计思路是在奥氏体不锈钢中添加一定量的 Al,使合金在腐蚀环境下能在表面形成均匀而致密的 Al_2O_3,以防止合金元素溶出和液态铅铋侵蚀[11]。Wang 等[12]将高 Mn AFA 钢 Fe-23Mn-(5-7)Al-1Cr暴露于 450 ℃的静态铅铋中进行测试。在不同氧浓度下高 Mn AFA 钢的耐腐蚀性随着 Al 含量的增加而增强。Shi 等[13]研究了 Y 和Nb 元素对 Fe-(15-16)Cr-(24-28)Ni-4Al AFA 钢在 600 和 650 ℃静态铅铋环境中耐腐蚀性能的影响。结果表明,在腐蚀初期,Y 的加入有助于 Cr 和 Al 的选择性氧化，而 Nb 的加入增加了 Cr 在奥氏体中的活性,促进 Cr_2O_3 的形成。这些研究结果都说明 Al 元素在保护性氧化膜的生成过程中起到了重要的作用。

21 世纪初,多主元合金的出现为合金设计提供了一种新的思路[14-15]。传统金属材料只有一种或两种主要元素,而多主元合金通常由 4 种以上主要元素组成。目前,多主元合金在核能系统中的应用前景已逐渐得到国内外学者的重视，被认为是第 IV 代核能系统中的一种潜在候选结构材料,并在世界范围内进行了初步研究[16-17]。Shi 等[18]研究了 Cu 和 Nb 对 AlCrFeNi-X 合金在 600 ℃含氧量10^{-6}%(质量分数)的液态铅中腐蚀行为的影响。结果表明,Cu的加入降低了氧化膜的结合强度；而 Nb 的加入降低了氧在合金基体中的溶解度，有利于合金表面形成 Al_2O_3 膜。Yang 等[19]系统研究了 AlCrFeMoTi 涂层在 550 和 650 ℃液态铅铋中的腐蚀行为。经过 1 000 h 暴露，样品表面生成了由 Cr_2O_3、TiO_2 和$(Fe, Cr)_3O_4$ 组成的复合氧化层,并在腐蚀后保持致密,表现出良好的稳定性。

大量研究证明了 FeCrNiAl 基多主元合金在高温铅铋环境中的应用潜力[20],但所针对的腐蚀条件均为静态铅铋环境。对于条件更加苛刻的动态铅铋环境,仅有少量传统合金得到研究[21-22]。近期,一种无 Co 的高性能 FeNiCrAl 多主元合金展现出优异的抗铅铋腐蚀性能[23]和抗辐照性能[24]。其 Al 元素含量较高，在静态铅铋环境中能够形成结合力强、生长缓慢、致密性高的双层氧化膜,在 600 ℃饱和氧环境下表现出优异的铅铋相容性。对此,本研究主要针对该合金开展高温含氧铅铋环境下的动态腐蚀行为研究,以期获得动态腐蚀行为的相关数据及其机理,为该合金在铅铋核能系统中的应用提供理论依据与数据支撑，为铅铋核能系统先进结构材料的研发提供理论基础。

1　实验材料与方法

实验材料的原子比名义成分为 $Fe_{37}Ni_{36}Cr_{10}Al_{17}$。各种合金元素原材料按照名义成分配比后，使用真空电弧熔炼炉进行熔炼,然后采用水冷铜模吸铸,形成板状铸态试样。所获得的板材通过机械加工方式制成外径 25 mm、内径 17.5 mm、高 3 mm 的铅铋腐蚀所用环状试样,试样外环面为待测腐蚀面,进行抛光处理。

采用动态铅铋腐蚀实验装置,主要由实验釜、试样旋转机构、溶解氧传感器、气体回路组成。实验釜内置镀有氧化铝涂层的不锈钢坩埚，坩埚中盛放腐蚀介质液态铅铋合金。实验前将样品固定在试样旋转机构上,并浸没在液态铅铋中,实验时采用电机驱动试样架旋转以实现动态铅铋腐蚀，旋转角速度与试样架半径的乘积即为样品表面的铅铋流速。实验过程中采用溶解氧传感器监测液态铅铋含氧量,同时电子控制系统根据设定的氧浓度目标值自动调节 H_2/Ar 混合气体与 O_2/Ar 混合气体的流量,实现铅铋溶解氧浓度的实时精确控制。实验过程中液态铅铋的温度和溶解氧曲线如图 1 所示。

铅铋腐蚀实验温度控制为 550 ℃，设置铅铋流速为 2 m/s,氧控条件为 10^{-7}%(质量分数),腐蚀时间为 2 000 h。测试后的试样使用金相砂纸对截面进行打磨,然后使用金刚石抛光膏抛光。使用扫描电子显微镜(TESCAN MIRA3 SEM)对抛光后的试样进行观察，表征氧化膜及腐蚀区域的形貌和厚度等信息。采用能谱仪(Oxford EDS)对氧化膜的成分进行分析,确定氧化膜的结构组成。

中国知网　https://www.cnki.net

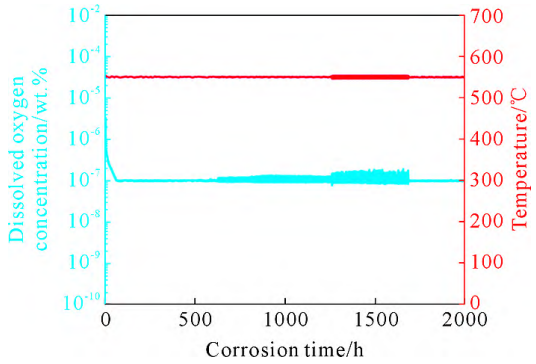


图 1 腐蚀实验中的溶解氧及温度曲线

Fig.1 Dissolved oxygen concentration and temperature curves during the corrosion experiment

2 实验结果及讨论

铸态 $Fe_{37}Ni_{36}Cr_{10}Al_{17}$ 合金微观组织如图 2a 所示。从图中可以观察到铸态合金主要由 2 种相组成，分别为 FCC 相和 B2 相。图 2d 是对应区域的 EDS 成分分析，各合金元素在两相中的含量均有明显差异，其中 Fe 和 Cr 主要富集于 FCC 相，而 B2 相中 Al 和 Ni 的含量较高。同时，作为奥氏体稳定化元素的 Ni 在 FCC 相中也有一定分布。由于两相的晶体结构和各元素含量均不相同，其在腐蚀过程中也将表现出显著的差别。图 2b 是环状样品被腐蚀后的整体形貌。从整体形貌来看，试样的形状仍然保持完整，合金的外环面没有明显的冲刷痕迹。图 2c 是较高倍数下试样外环面的局部形貌，可以看到试样表面附着的铅铋共晶(亮白色)。在界面处，能够观察到较为普遍的铅铋渗入，表明合金发生一定的液态铅铋溶解腐蚀，平均深度约为 25 μm。除此之外，也有部分位置没有溶解腐蚀，说明 FeNiCrAl 合金在氧含量为 10^{-7}%(质量分数) 的环境中有条件形成保护性的氧化膜，但在流动铅铋的持续冲刷下，氧化膜的连续性可能无法保障。

为了更好地分析 FeNiCrAl 合金的氧化膜，使用 EDS 对没有发生溶解腐蚀的位置进行成分分析，其结果见图 3。氧元素分布图清晰显示了合金表面氧化层的存在，厚度约为 5 μm。氧化层主要含有 Al 和 Cr，其次还有少量 Fe 元素。值得注意的是，合金内部不含 Pb 和 Bi，说明该处形成的氧化层致密性良好，将合金和液态铅铋有效隔绝。在静态腐蚀研究中，FeNiCrAl 合金在与含饱和氧铅铋接触时能够生成双层氧化膜[23]。而在本文流动铅铋和较低氧含量的条件下，合金表面只观察到了单层的氧化膜存在。

图 4 是试样两相表面氧化层的线扫结果。可以明显看到合金内部铅铋含量极低，说明没有铅铋渗透。氧化层主要含有 Al 和 Cr，其中 B2 相表面氧化层的 Al 含量略高于 FCC 相，这主要得益于 B2 相自身含有更多的 Al，促进了含 Al 氧化层的生成。Fe 元素在靠近铅铋一侧出现了一个较小的峰，说明合金形成了与静态腐蚀条件下类似的双层氧化层。但铁氧化层致密性差且结合力弱，在流动铅铋的冲刷下

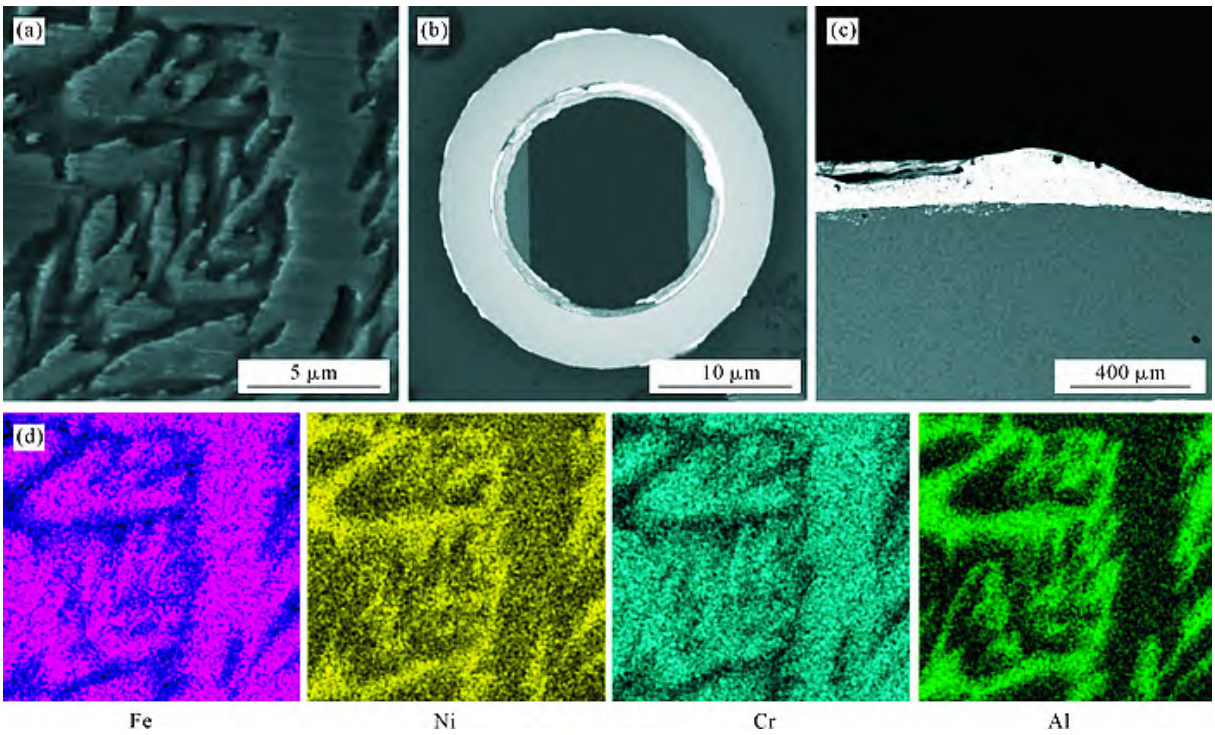


图 2 FeNiCrAl 多主元合金镜显微组织：(a) 铸态微观组织；(b) 腐蚀后样品整体形貌；(c) 腐蚀后样品局部形貌；(d) EDS 面分布

Fig.2 Microstructure of the FeNiCrAl multiprinciple component alloy: (a) microstructure of the as-cast alloy; (b) overall morphology of the sample after the corrosion test; (c) local morphology of the sample after the corrosion test; (d) EDS area mappings

中国知网 https://www.cnki.net

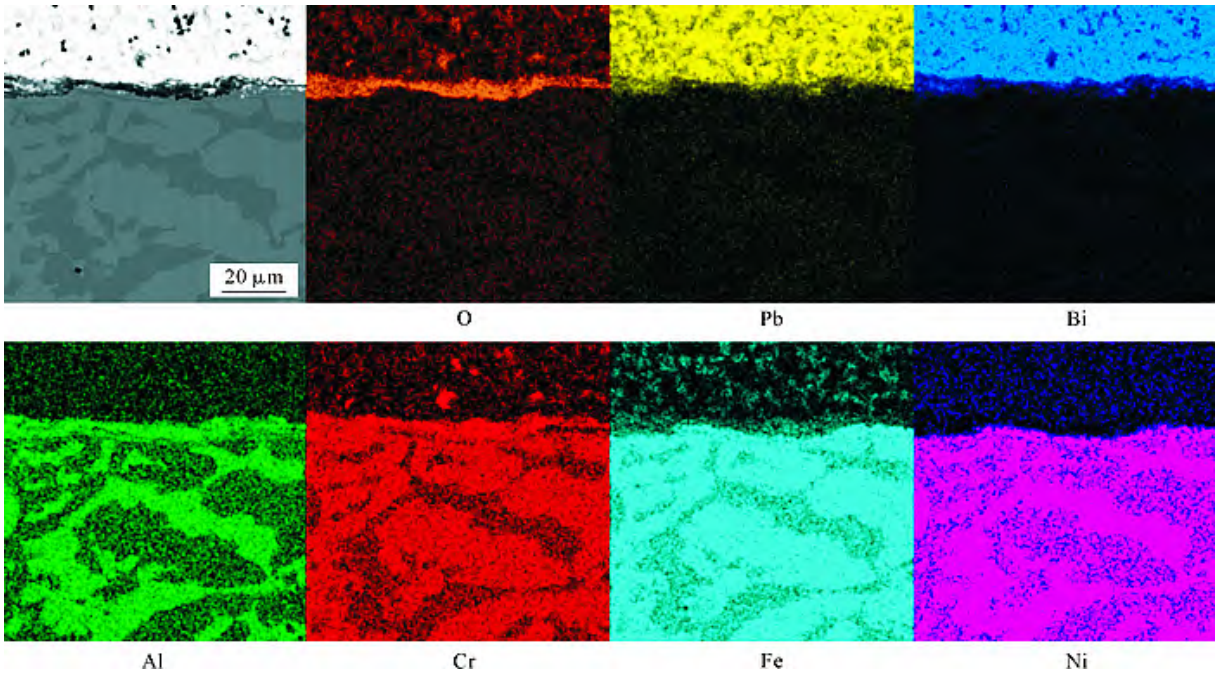


图 3 FeNiCrAl 合金氧化膜的 EDS 面分布

Fig.3 EDS area mappings of the oxidation layer on the FeNiCrAl alloy

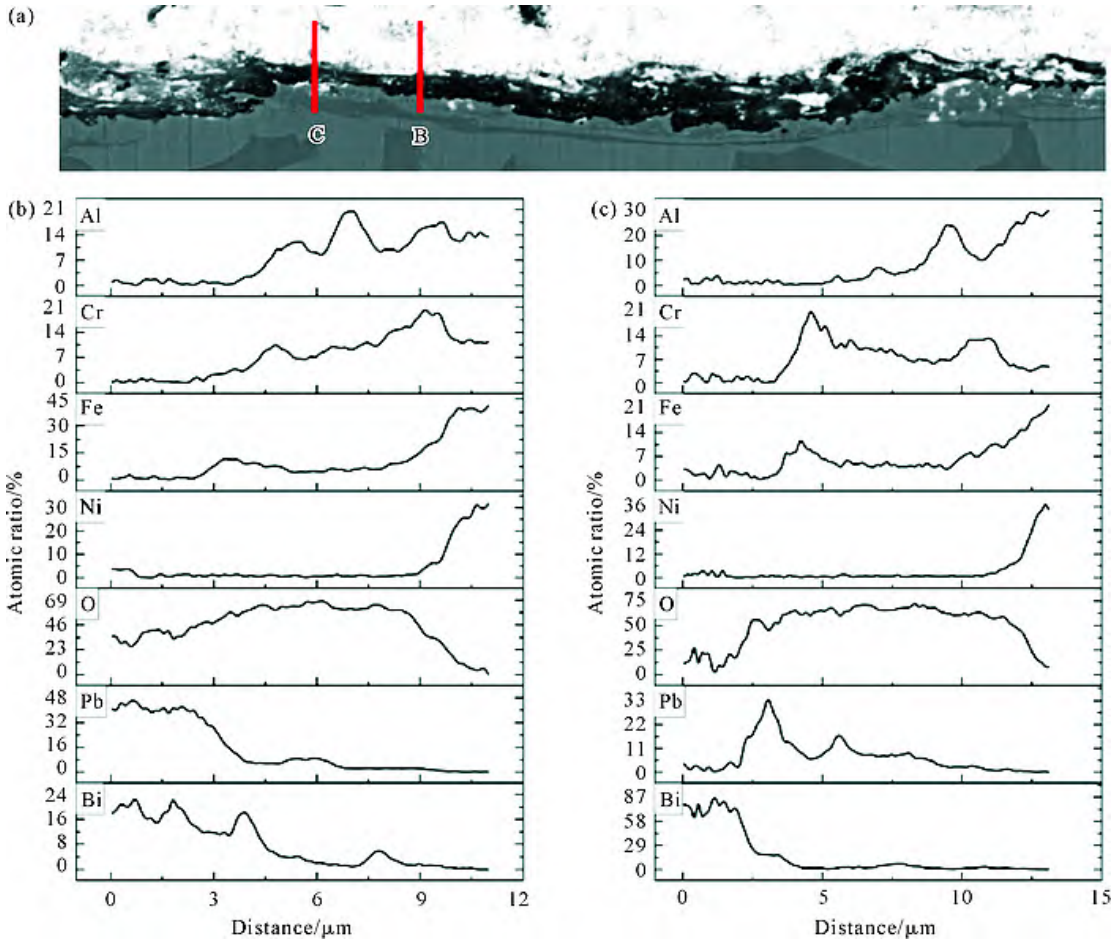


图 4 FeNiCrAl 合金氧化膜的 EDS 线扫:(a) SEM 像;(b) B 区域;(c) C 区域

Fig.4 EDS line scanning of the oxidation layer on the FeNiCrAl alloy: (a) SEM image; (b) region B; (c) region C

已大量脱落。经过 EDS 的面扫及线扫分析,在流速为 2 m/s 的液态铅铋冲刷下,FeNiCrAl 合金表面依然有条件形成致密的保护性氧化层。

图 5 给出了发生溶解腐蚀区域的 EDS 面扫结果。此处腐蚀深度约为 70 μm,可以观察到大量铅铋在相界处堆积。从氧元素分布图上能够看到合金表

中国知网　https://www.cnki.net

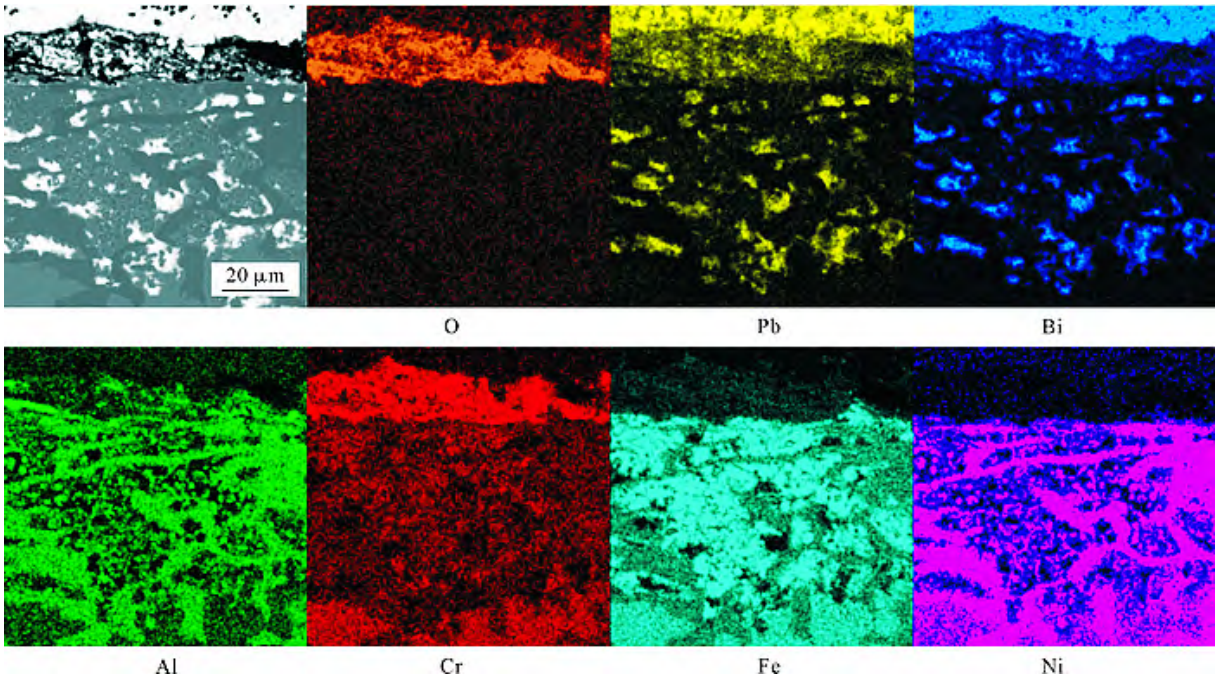


图 5 FeNiCrAl 多主元合金溶解腐蚀区域的 EDS 面分布

Fig.5 EDS area mappings of the dissolution corrosion region in the FeNiCrAl alloy

面生成了厚度 10 μm 以上的氧化层，参与氧化层形成的元素主要为 Cr。而 Al 元素在氧化层中的分布相比于图 3 呈现出明显的不均匀性，含量也显著下降。显然，Al 元素是否能进入氧化层并均匀分布于其中是 FeNiCrAl 合金抗铅铋腐蚀能力的重要影响因素。通过图 4 的 Al 分布可知，铝氧化物在氧化层中的分布与下方的相组成有关。

FeNiCrAl 合金生成了以 Cr_2O_3 为主的氧化层，不能将合金完全保护起来，使得溶解腐蚀现象较为严重，铅铋的渗入和合金元素的溶出都十分明显。从元素分布图上可以看到溶解腐蚀区域 Ni 含量显著降低。Ni 作为奥氏体稳定化元素，其大量流失必然导致 FCC 相稳定性下降。此外，Cr_2O_3 层的形成消耗了大量的 Cr 元素，令氧化层下方出现了明显的贫 Cr 区，而 Cr 元素的消耗则使氧化层下方金属的抗腐蚀能力进一步减弱。

由于 FCC 相和 B2 相在元素成分、晶体结构等方面的区别，其溶解腐蚀行为也存在显著差异。液态铅铋主要腐蚀 FCC 相，与其中的 Ni 元素进行互扩散，从而将 Ni 溶出。随着氧化层对 Cr 的消耗以及 Ni 含量的降低，被腐蚀后的 FCC 相中 Fe 含量出现了明显的升高。注意到 FCC 相被腐蚀后其中分布着大量弥散的析出相，这些析出相尺寸微小，EDS 结果显示该相富含 Al 和 Ni。B2 相拥有相当强的抗腐蚀能力，因此当铅铋接触到 FCC/B2 相界时，将会在界面处发生堆积，无法继续向 B2 相内扩散。B2 相的抗腐蚀能力来自于其中所含的大量 Al，当铅铋扩散至相界处与 B2 相接触时，很可能形成了只有纳米尺度厚度的 Al_2O_3 层，阻止了铅铋的进一步扩散。综上所述，FeNiCrAl 合金中 B2 相具备极高的抗腐蚀能力，而 FCC 相则相对容易发生溶解腐蚀。

为了更加定量地分析 FeNiCrAl 腐蚀前后成分的变化，使用 EDS 对腐蚀区和未腐蚀区的各相成分进行了表征，其结果列于表 1 中。在未腐蚀区的FCC 和 B2 中都有一定量的氧元素，反映出氧元素的渗透几乎不可避免。

经过腐蚀后，B2 相的成分相较于腐蚀前没有明显变化。FCC 相则遭受严重的溶解腐蚀，成分出现

表1 FeNiCrAl多主元合金溶解腐蚀区域各相的化学成分

Tab.1 Chemical composition of the dissolution corrosion region in the FeNiCrAl alloy

(atomic fraction/%)

Position	Phase	Element						
		Fe	Ni	Cr	Al	O	Pb	Bi
Matrix	FCC	42.39	29.42	13.68	11.50	3.00	0.00	0.00
	B2	22.62	41.14	5.46	28.95	1.83	0.00	0.07
Corroded	FCC	81.13	3.46	10.82	1.84	2.64	0.11	0.00
	B2	22.27	40.68	5.01	30.29	1.68	0.03	0.03
	Precipitation	13.89	43.78	2.57	36.91	2.01	0.46	0.37

中国知网 https://www.cnki.net

了明显的变化。由于 Ni 在铅铋中极高的溶解度,FCC 相中的 Ni 大幅降低,含量已不足 4%(原子分数);相对地,Fe 含量显著升高,经过腐蚀后,FCC 相中 Fe 含量超过 80%(原子分数)。以上结果表明,腐蚀区的 FCC 相实际已经转变为 BCC 结构,即发生了 γ→α 相变。由于 Al 的溶解度在 BCC 相中低于 FCC 相,因此原本溶解在 FCC 相中的 Al 以 B2 相的形式弥散分布于其中。

3　结论

(1)Al 元素是影响合金抗腐蚀能力的关键。当合金表面形成富 Al 氧化层时,致密的氧化层能够将液态铅铋与合金隔绝,从而避免了溶解腐蚀的发生;若氧化层 Al 含量较低,则不能起到足够的保护作用。

(2)在溶解腐蚀发生过程中,B2 相未发生明显变化,表现出优异的抗腐蚀能力;FCC 相中的 Ni 元素被大量溶出,稳定性下降,转变为以 Fe 元素为主的 BCC 相,同时内部析出了大量呈弥散分布的 B2相。

(3)双相 $Fe_{37}Ni_{36}Cr_{10}Al_{17}$ 多主元合金经过 2 000 h 的腐蚀测试,溶解腐蚀平均深度为 25 μm。相比于 T91、15-15Ti 等传统商用合金,该合金的腐蚀深度显著降低,对铅铋核能系统的工程化建设具有重要意义。

参考文献:

[1] TARANTINO M, ANGIOLINI M, BASSINI S, CATALDO S, CIANTELLI C, CRISTALLI C, DEL NEVO A, DI PIAZZA I, DIAMANTI D, EBOLI M, FIORE A, GRASSO G, LODI F, LORUSSO P, MARINARI R, MARTELLI D, PAPA F, SARTORIO C, UTILI M, VENTURINI A. Overview on lead-cooled fast reactor design and related technologies development in ENEA[J]. Energies, 2021, 14(16): 5157.

[2] LI N. Lead-alloy coolant technology and materials-technology readiness level evaluation[J]. Progress in Nuclear Energy, 2008, 50 (2-6): 140-151.

[3] ALEMBERTI A. The lead fast reactor: An opportunity for the future?[J]. Engineering, 2016, 2(1): 59-62.

[4] TSISAR V, GAVRILOV S, SCHROER C, STERGAR E. Long-term corrosion performance of T91 ferritic/martensitic steel at 400 ℃ in flowing Pb-Bi eutectic with 2×10^{-7} mass% dissolved oxygen[J]. Corrosion Science, 2020, 174: 108852.

[5] XIAO J, GONG X, XIANG C Y, YU Z Y, WANG H, ZHAO K, LIU C H, ZHOU H, QIU S Y, YIN Y. A refined oxidation mechanism proposed for ferritic-martensitic steels exposed to oxygen-saturated liquid lead-bismuth eutectic at 400 ℃ for 500 h[J]. Journal of Nuclear Materials, 2021, 549: 152852.

[6] SCHROER C, WEDEMEYER O, NOVOTNY J, SKRYPNIK A, KONYS J. Selective leaching of nickel and chromium from Type 316 austenitic steel in oxygen-containing lead-bismuth eutectic (LBE)[J]. Corrosion Science, 2014, 84: 113-124.

[7] CHARALAMPOPOULOU E, LAMBRINOU K, VAN DER DONCK T, PALADINO B, DI FONZO F, AZINA C, EKLUND P, MRÁZ S, SCHNEIDER J M, SCHRYVERS D, DELVILLE R. Early stages of dissolution corrosion in 316L and DIN 1.497 0 austenitic stainless steels with and without anticorrosion coatings in static liquid lead-bismuth eutectic (LBE) at 500 ℃[J]. Materials Characterization, 2021, 178: 111234.

[8] XU Z Y, SONG L L, ZHAO Y Y, LIU S J. The formation mechanism and effect of amorphous SiO_2 on the corrosion behaviour of Fe-Cr-Si ODS alloy in LBE at 550 ℃[J]. Corrosion Science, 2021, 190: 109634.

[9] WANG H R, YU H, LIU J R, KONDO S, OKUBO N, KASADA R. Characterization and corrosion behavior of Al-added high Mn ODS austenitic steels in oxygen-saturated lead-bismuth eutectic[J]. Corrosion Science, 2022, 209: 110818.

[10] YAMAMOTO Y, BRADY M P, LU Z P, MAZIASZ P J, LIU C T, PINT B A, MORE K L, MEYER H M, PAYZANT E A. Creep-resistant, Al_2O_3-forming austenitic stainless steels[J]. Science, 2007, 316(5823): 433-436.

[11] LIM J, HWANG I S, KIM J H. Design of alumina forming FeCrAl steels for lead or lead-bismuth cooled fast reactors[J]. Journal of Nuclear Materials, 2013, 441(1-3): 650-660.

[12] WANG H R, YU H, KONDO S, OKUBO N, KASADA R. Corrosion behaviour of Al-added high Mn austenitic steels in molten lead bismuth eutectic with saturated and low oxygen concentrations at 450 ℃ [J]. Corrosion Science, 2020, 175: 108864.

[13] SHI H, FETZER R, TANG C C, SZABÓ D Z, SCHLABACH S, HEINZEL A, WEISENBURGER A, JIANU A, MÜLLER G. The influence of Y and Nb addition on the corrosion resistance of Fe-Cr-Al-Ni model alloys exposed to oxygen-containing molten Pb[J]. Corrosion Science, 2021, 179: 109152.

[14] CANTOR B, CHANG I T H, KNIGHT P, VINCENT A J B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys [J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 375-377: 213-218.

[15] YEH J W, CHEN S K, LIN S J, GAN J Y, CHIN T S, SHUN T T, TSAU C H, CHANG S Y. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes[J]. Advanced Engineering Materials, 2004, 6(5): 299-303.

[16] 贾宇浩,王志军,吴庆峰,王晋宇,刘林翔,何峰,李俊杰,王锦程. 高熵合金高温性能研究进展[J]. 铸造技术,2022, 43(11): 935-947.
JIA Y H, WANG Z J, WU Q F, WANG J Y, LIU L X, HE F, LI J J, WANG J C. Research progress on high temperature properties of high-entropy alloys[J]. Foundry Technology, 2022, 43(11): 935-947.

[17] 陈维铅,喇培清,罗刚,许世鹏. Fe-Al 涂层制备及耐熔盐腐蚀性研究 [J]. 铸造技术,2022, 43(11): 948-954.
CHEN W Q, LA P Q, LUO G, XU S P. Review of preparation and corrosion resistance of Fe-Al coatings in molten salt[J]. Foundry Technology, 2022, 43(11): 948-954.

[18] SHI H, FETZER R, JIANU A, WEISENBURGER A, HEINZEL A, LANG F, MÜLLER G. Influence of alloying elements (Cu, Ti, Nb) on the microstructure and corrosion behaviour of AlCrFeNi-based high entropy alloys exposed to oxygen-containing molten Pb[J].

中国知网　https://www.cnki.net

Corrosion Science, 2021, 190: 109659.

[19] YANG J, SHI K, ZHANG W, CHEN Q S, NING Z E, ZHU C D, LIAO J L, YANG Y Y, LIU N, ZHANG W, YANG J J. A novel AlCrFeMoTi high-entropy alloy coating with a high corrosion-resistance in lead-bismuth eutectic alloy[J]. Corrosion Science, 2021, 187: 109524.

[20] 金妮, 刘浩翔, 武宇浩, 刘栩东, 贺一轩, 王军, 李金山. 热机械处理 Al-Co-Fe-Ni 共晶高熵合金组织性能研究[J]. 铸造技术, 2024, 45(4): 335-341.
JIN N, LIU H X, WU Y H, LIU X D, HE Y X, WANG J, LI J S. Effect of thermomechanical processing on the microstructure and mechanical properties of Al-Co-Fe-Ni eutectic high-entropy alloy [J]. Foundry Technology, 2024, 45(4): 335-341.

[21] KONDO M, TAKAHASHI M, SUZUKI T, ISHIKAWA K, HATA K, QIU S Z, SEKIMOTO H. Metallurgical study on erosion and corrosion behaviors of steels exposed to liquid lead-bismuth flow [J]. Journal of Nuclear Materials, 2005, 343(1-3): 349-359.

[22] LI C, FANG X D, WANG Q S, SHEN M L, WANG H L, ZENG X, LIU Y J, MENG G. A synergy of different corrosion failure modes pertaining to T91 steel impacted by extreme lead-bismuth eutectic flow pattern[J]. Corrosion Science, 2021, 180: 109214.

[23] 黄赟浩, 王健斌, 王志军, 赵可. 铅铋合金环境中高强 AlCrFeNi 多主元合金的腐蚀行为[J]. 核动力工程, 2023, 44(S1): 137-142.
HUANG Y H, WANG J B, WANG Z J, ZHAO K. Corrosion behavior of high strength AlCrFeNi multi-principle-component alloy in lead-bismuth alloy[J]. Nuclear Power Engineering, 2023, 44(S1): 137-142.

[24] ZHOU Y H, LIU S F, CHEN D,WU Q F, XIAO B, HE F, WANG Z J, YANG T, KAI J J. Tailoring the radiation tolerance of eutectic high-entropy alloy via phase-composition control [J]. Journal of Nuclear Materials, 2023, 584: 154561.

(责任编辑:杨浩雪)

中国知网 https://www.cnki.net