

镁合金腐蚀测试与表征方法的研究进展

邓日求, 付小玲, 孔祥斌, 赖汉文, 曾哲熙, 李林蔚, 王 朝

(广东工业大学 材料与能源学院, 广东 广州 510006)

摘 要:目前镁合金腐蚀的测试方法主要有析氢法、失重法和电化学测试法。这3种测试方法各具特点,析氢法和失重法均为研究一段时间内的腐蚀过程,而电化学测试法则注重研究在某个时间点的腐蚀瞬时变化过程,3种研究方法相辅相成、相互验证,在研究镁合金的腐蚀性能时同时使用这3种方法中的两至3种可以提升实验的可靠性和真实性。目前主要的表征方法有SEM、XRD、XPS和AFM。

关键词:析氢;失重;极化;阻抗

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20201578

中图分类号: TG178; TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2021)16-0008-05

Research Progress on Corrosion Testing and Characterization Methods of Magnesium Alloys

DENG Riqiu, FU Xiaoling, KONG Xiangbin, LAI Hanwen, ZENG Zhexi,

LI Linwei, WANG Chao

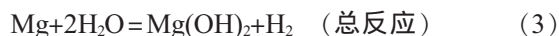
(School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: At present, the testing methods of magnesium alloy corrosion mainly include hydrogen evolution, weight loss and electrochemical test. These three test methods have their own characteristics. The hydrogen evolution and the weight loss were all studied in the corrosion process for a period of time, while the electrochemical test method focuses on the study of the transient change process of corrosion at a certain point in time. The three research methods complement each other and verify each other. The use of two or three of these three methods in the study of the corrosion properties of magnesium alloys can improve the reliability and authenticity of the experiment. The main characterization methods at present are SEM, XRD, XPS and AFM.

Key words: hydrogen evolution; weight loss; polarization; EIS

镁及镁合金具有资源丰富、密度小、比强度比刚度高、切削加工性能好、易于回收等特点,应用领域十分广泛,在航空、航天、交通工具以及电子通信等行业被广泛应用^[1-3]。由于镁合金与人体骨骼的弹性模量接近,且具有优异的抗拉、抗压强度,以及体内的可吸收性,使其在生物可降解材料方面成为研究热点^[4]。然而其耐腐蚀性能较差,严重限制了其在工业应用中的发展。因此,对镁合金腐蚀性能的研究极为重要。本文对于镁合金腐蚀研究方法的现状进行了概述和总结。本文介绍的是氯化钠溶液体系,一般

镁在氯化钠溶液中的反应为^[2]:



1 腐蚀测试方法

1.1 失重法

失重法是测试腐蚀速率最简单和最基础的测试方法,测量的是试样整个腐蚀过程的平均腐蚀速率^[5]。试样在腐蚀过程中,与溶液发生反应,通过称量样品腐蚀前后的质量,换算后可得到平均腐蚀速率。浸泡实验前称得样品质量为 W_b ;腐蚀后,去除表面的腐蚀产物称得样品质量 W_a 。失重速率, ΔW (mg/cm²/day)计算公式^[6-8]:

$$\Delta W = \frac{W_b - W_a}{At} \quad (4)$$

式中: A 为试样的表面积; t 为腐蚀时间。

平均腐蚀速率 P_w (mm/year)计算公式^[5,9-10]:

收稿日期:2020-06-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51601019)

作者简介:邓日求(1995-),男,湖北黄冈人,硕士,主要从事镁基复合材料耐蚀性能的研究;电话:17818589079;

E-mail: dengriqiu@mail2.gdut.edu.cn

通讯作者:付小玲(1980-),女,湖北荆州人,副教授,博士,主要研究方向:

金属玻璃复合材料、镁基纳米复合材料;

E-mail: fuxiaoling@gdut.edu.cn

$$P_w = 2.10 \Delta W \quad (5)$$

失重法的优点在于能准确测量试样的平均腐蚀速率以及试样的整体腐蚀程度,但不能反映腐蚀过程中反应速率的变化。

去除腐蚀产物方法:通常用 CrO_3 和 AgNO_3 配制的铬酸溶液清洗腐蚀过后的样品,再用去离子水洗净、吹干,放置干燥皿 1~2 d^[11-15],可去掉表面的腐蚀产物且几乎不与基体发生反应^[8-16],从而保证失重法测试的准确性。

1.2 析氢法

析氢法可同时测瞬时的腐蚀速率(一小段时间内) $P_H(\text{mm/y})$ 和平均腐蚀速率(整个腐蚀过程) $P_{AH}(\text{mm/y})$ ^[5],析氢法是通过收集反应过程中生成的气体,换算后推算出试样的反应速率,其装置示意图如图 1 所示,由 1 mol 镁金属的腐蚀可生成 1 mol (22.4 L) 的氢气,因此析氢速率 $V_H(\text{mL/cm}^2 \cdot \text{day}^{-1})$ 可以转化为失去的质量, $\Delta W(\text{mg/cm}^2 \cdot \text{day}^{-1})$ 通过^[5,17-18]:

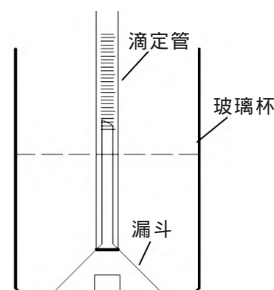


图 1 析氢实验装置示意图

Fig.1 Device schematic of hydrogen evolution experimental

$$\Delta W = 1.085 V_H \quad (6)$$

相应腐蚀速率, $P_H(\text{mm/year})$ 计算公式^[7-8]:

$$P_H = 2.279 V_H \quad (7)$$

析氢法的优点在于能连续不断的观察整个腐蚀过程,但实验过程中析氢法测得的腐蚀速率总是会略小于失重法测得的腐蚀速率,这是由于会有部分氢气会溶解在镁基体中^[19-21]。失重法和析氢法测得的平均腐蚀速率作对比,如表 1 所示,可用来检验测试

表 1 失重法、析氢法和电化学测试法测得的腐蚀速率

Tab.1 Corrosion rate measured by weight loss, hydrogen evolution and electrochemical test

第一作者	镁合金成分	工艺	时间 /d	$P_w/(\text{mm} \cdot \text{y}^{-1})$	$P_{AH}/(\text{mm} \cdot \text{y}^{-1})$	$P_H/(\text{mm} \cdot \text{y}^{-1})$	$P_i/(\text{mm} \cdot \text{y}^{-1})$	$P_{LIS}/(\text{mm} \cdot \text{y}^{-1})$	溶液
Qiao ^[26]	HP Mg01	铸造	3	17.2	12.5	12.49	4.36	—	3.5wt% NaCl 含饱和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$
	HP Mg02		3	14.0	8.62	8.67	4.89	—	
	HP Mg03		5	3.46	2.86	2.87	1.12	0.76	
	HP Mg04		5	3.68	2.64	2.64	0.98	0.71	
	HP Mg05		7	5.47	4.27	4.27	1.77	1.23	
	HP Mg06		7	4.81	4.36	4.35	2.84	1.98	
	UP Mg01		7	0.69	0.42	0.41	0.34	0.25	
	UP Mg02		7	0.65	0.41	0.40	0.38	0.24	
Cao ^[8]	HP Mg01	铸造	7	0.79	0.42	0.46	0.30	0.30	3.5wt% NaCl 含饱和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$
	HP Mg02		7	0.54	0.37	0.34	0.23	0.14	
	Mg0.3Ca01		7	1.13	0.57	0.67	0.71	0.48	
	Mg0.3Ca02		7	1.37	0.44	0.47	0.48	0.37	
	Mg1Mn01		7	4.27	4.15	4.12	2.26	1.90	
	Mg1Mn02		7	1.51	0.99	0.89	0.50	0.27	
	Mg6Al01		7	4.95	4.79	6.35	4.25	4.55	
	Mg6Al02		7	3.67	3.40	3.43	2.33	2.33	
	Mg0.1Sr01		7	5.84	4.25	4.87	4.09	3.06	
	Mg0.1Sr02		7	4.68	3.89	4.18	3.24	0.75	
	Mg5Sn01		7	6.18	4.55	4.47	3.52	3.61	
	Mg5Sn02		7	5.46	4.45	4.23	2.74	2.45	
	Mg0.3Si01		7	10.6	8.47	6.58	5.30	4.00	
	Mg0.3Si02		7	6.50	5.12	3.85	3.18	2.33	
	Mg5Zn01		7	14.4	13.9	19.2	6.92	15.9	
	Mg5Zn02		7	15.9	13.1	18.4	8.77	13.5	
	Mg0.1Zr01		7	27.6	25.2	39.1	20.0	31.6	
	Mg0.1Zr02		7	6.92	6.62	10.0	5.99	5.61	

表 1 续

第一作者	镁合金成分	工艺	时间	$P_w/(\text{mm} \cdot \text{y}^{-1})$	$P_{\text{AH}}/(\text{mm} \cdot \text{y}^{-1})$	$P_H/(\text{mm} \cdot \text{y}^{-1})$	$P_i/(\text{mm} \cdot \text{y}^{-1})$	$P_{\text{EIS}}/(\text{mm} \cdot \text{y}^{-1})$	溶液
Shi ^[19]	HP Mg01	铸造	7d	0.79	0.42	0.46	0.23	0.19	3.5wt% NaCl 含饱和 Mg(OH) ₂
	HP Mg02		7d	0.54	0.37	0.34	0.19	0.19	
	Mg0.6Nd01		7d	5.63	3.88	6.63	4.97	3.59	
	Mg0.6Nd02		7d	4.61	3.26	4.84	3.67	2.83	
	Mg5Y01		7d	8.15	6.36	12.1	3.37	2.24	
	Mg5Y02		7d	6.29	5.29	9.90	2.85	2.33	
	Mg0.9Ce01		7d	8.50	7.03	22.0	5.49	4.50	
	Mg0.9Ce02		7d	12.7	10.7	13.0	7.98	5.35	
	Mg0.7La01		7d	18.1	16.5	19.0	11.5	9.81	
	Mg0.7La02		7d	16.0	16.1	21.0	12.5	11.1	
	Mg5Gd01		7d	61.0	58.0	67.0	24.0	24.1	
	Mg5Gd02		7d	56.0	53.0	69.0	12.8	13.7	
Cao ^[27]	UP Mg	蒸馏	14d	1.46	0.77	1.38	0.51	0.52	3.5wt% NaCl 含饱和 Mg(OH) ₂
			14d	0.50	0.41	0.16	0.02	0.02	
			14d	0.53	0.09	0.09	0.06	0.04	
			14d	0.71	0.22	0.19	0.05	0.04	
Cao ^[28]	Mg0.1Si, 大孔	铸造	7d	6.0	4.5	7.5	4.7	3.4	3.5wt% NaCl 含饱和 Mg(OH) ₂
	Mg0.1Si, 小孔		7d	4.3	3.0	6.9	4.0	2.8	
	Mg0.1Si, 无孔		7d	2.5	1.7	63.0	5.1	2.4	
Jiang ^[29]	AZ31	挤压	5d	29	22	—	12	—	3.5wt% NaCl
		交叉轧制	5d	18	13	—	8	—	
		单向轧制	5d	8	6	—	3	—	

注: P_w 为失重法测得的平均腐蚀速率; P_{AH} 为析氢法测得的平均腐蚀速率 (整个析氢过程); P_H 为析氢法测得的瞬时腐蚀速率 (一小段时间内); P_i 为极化曲线测得的腐蚀速率; P_{EIS} 为交流阻抗测得的腐蚀速率

数据的可靠性和真实性。

1.3 电化学测试法

采用电化学测试法可以获得腐蚀过程中任意一时间点的腐蚀状态, 主要包括极化测试和交流阻抗测试两部分。

(1) 极化测试可获得某个时间点的极化曲线, 通过对曲线的拟合可以获得腐蚀电位 E_{corr} (V) 和 i_{corr} (mA/cm^2), 腐蚀速率 P_i (mm/year) 计算公式^[9-10, 22-23]:

$$P_i = 22.8 i_{\text{corr}} \quad (8)$$

极化曲线拟合通常使用 Tafel extrapolation method 和 Levenberg-Marquardt (LEV) method 两种方法。前者选择使用最宽的范围进行线性拟合, 而有些阳极极化曲线是高度非线性的, 使得拟合过程非常困难; 后者则是使用公式对极化曲线进行拟合, 电流密度计算公式^[5, 8]:

$$i = i_{\text{corr}} (10^{(E-E_{\text{corr}})/\beta_a} + 10^{-(E-E_{\text{corr}})/\beta_c}) \quad (9)$$

这种方法可获得腐蚀电流密度 i_{corr} 、腐蚀电位 E_{corr} 、阳极极化曲线斜率 β_a 和阴极极化曲线斜率 β_c 等参数的较为准确的拟合值。

极化曲线是研究电化学腐蚀的重要理论工具, 利用极化曲线可解释腐蚀过程中所发生的现象, 分析腐蚀过程的性质和影响因素, 确定腐蚀的主要控制因素, 计算腐蚀速率, 研究防腐蚀剂的效果和作用机理等。

(2) 交流阻抗测试可获得某个时间点的阻抗图谱, 阻抗图谱分为 Nyquist 图和 bode 图, 通过对 Nyquist 图进行拟合, 得到极化电阻 R_p , 可获电流密度 i_{corr} (mA/cm^2) 计算公式^[7, 10, 24]:

$$i_{\text{corr}} = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3 R_p (\beta_c - \beta_a)} \quad (10)$$

得 P_{EIS} (mm/cm^2), 计算公式:

$$P_{\text{EIS}} = 22.8 i_{\text{corr}} \quad (11)$$

可将交流阻抗测得的腐蚀速率 P_{EIS} 、极化曲线测得的腐蚀速率 P_i 和析氢法测得的瞬时腐蚀速率 P_H 三者相比较, 如表 1 所示, 若数据趋势相同, 且可从原理解释三者之间的相差关系, 则表明测得的腐蚀速率较为准确。

Gomes 等^[25]通过建立模型对阻抗图进行分析来计算腐蚀表面氧化膜的厚度以及腐蚀产物层的厚

度,以此分析镁合金的腐蚀机理。

2 表征方法

2.1 SEM

扫描电镜是利用细聚焦电子束在样品表面扫描时激发出来的各种物理信号来调制成像的。其优点是具有较高的放大倍数和很大的景深,可直接观察试样凹凸不平表面的细微结构^[26-30]。前的扫描电镜都配有X射线能谱仪装置,可同时进行显微组织形貌的观察和微区成分分析。Niu等^[31]通过SEM/EDS来表征了Mg-4Zn-xNi的第二相形态和元素分布特点。

2.2 XRD

X射线衍射(X-ray diffraction),通过对材料进行X射线衍射,分析其衍射图谱,用于确定晶体的原子和分子结构^[32]。Li等^[33]对Mg-Li合金进行XRD分析,Mg-4Li合金由HCP结构的 α -Mg相组成,Mg-7.5Li合金为HCP(α -Mg)和BCC(β -Li)的双相结构,Mg-14Li合金为单相BCC结构,以便研究影响Mg-Li合金腐蚀速率的因素。

2.3 XPS

X射线光电子能谱分析(X-ray photoelectron spectroscopy)是用X射线去辐射样品,使原子或分子的内层电子或价电子受激发射出来产生光电子,既可用于定量分析也可定性分析,主要用于成分和化学态的分析^[30]。Liu等^[34]利用XPS定量研究了在Mg和Mg-Al金属间化合物上形成的表面膜: Al_3Mg_2 和 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$,并计算腐蚀表面的氧化膜厚度以及腐蚀产物层厚度。

2.4 AFM

原子力学显微镜(AFM)可在大气条件下观察样品,可达到接近原子分辨,还可用于测量表面原子间的力^[30]。不需要进行其他制样处理,可得到样品表面的三维形貌图象,并可对表面进行粗糙度计算。Zhan等^[35]用AFM测试得到的四种不同涂层样品的三维图像,选择立体图的平面对角线方向观察表面高度(在 z 轴方向上)的波动,以计算涂层表面的粗糙度。

3 结语与展望


(1) 镁及镁合金的腐蚀及其腐蚀机理已被广泛研究,腐蚀包括全面腐蚀和局部腐蚀。局部腐蚀主要分为点蚀、丝状腐蚀、晶间腐蚀、缝隙腐蚀和电偶腐蚀等^[36-37],镁合金在氯化钠溶液中多数是发生局部

腐蚀。

(2) 可依据电化学测试的结果(极化曲线和交流阻抗图)结合表征方法来分析镁合金腐蚀机理,这对于研究镁合金腐蚀性能极为重要,通过对机理的分析以研究合适的方法来提高镁合金的耐蚀性能。因此,应选择合适的测试方法和表征方法来研究镁合金的腐蚀及其腐蚀机理,以提高镁合金的耐蚀性能,从而扩大镁合金在工业中的应用。

参考文献:

- [1] 邱六,朱胜,王晓明,等. 镁合金腐蚀与防护的研究现状[J]. 热加工工艺,2018,47(16):31-36.
- [2] 余刚,刘跃龙,李瑛,等. 镁合金的腐蚀与防护[J]. 中国有色金属学报,2002,12(6):1087-1098.
- [3] 张高会,张平则,潘俊德. 镁及镁合金的研究现状与进展[J]. 世界科技研究与发展,2003,25(1):72-78.
- [4] 唐炜. 镁基金属复合生物材料的制备及其性能研究[D]. 长沙:中南大学,2011.
- [5] Shi Z, Atrens A. An innovative specimen configuration for the study of Mg corrosion [J]. Corrosion Science,2011,53 (1): 226-246.
- [6] Zhao M C, Schmutz P, Brunner S, et al. An exploratory study of the corrosion of Mg alloys during interrupted salt spray testing[J]. Corrosion Science,2009,51(6):1227-1292.
- [7] Qiao Z, Shi Z, Hort N, et al. Corrosion behaviour of a nominally high purity Mg ingot produced by permanent mould direct chill casting[J]. Corrosion Science,2012,61:185-207.
- [8] Cao F, Shi Z, Song G L, et al. Corrosion behaviour in salt spray and in 3.5%NaCl solution saturated with $\text{Mg}(\text{OH})_2$ of as-cast and solution heat-treated binary Mg-X alloys: X=Mn,Sn,Ca,Zn,Al,Zr,Si,Sr [J]. Corrosion Science,2013,76 (11): 60-97.
- [9] Shi Z, Liu M, Atrens A. Measurement of the corrosion rate of magnesium alloys using Tafel extrapolation [J]. Corrosion Science,2010,52(2):579-588.
- [10] Liu M, Schmutz P, Uggowitzer P J, et al. The influence of yttrium(Y) on the corrosion of Mg-Y binary alloys[J]. Corrosion Science,2010,52(11):3687-3701.
- [11] Zhao M C, Liu M, Song G, et al. Influence of the β -phase morphology on the corrosion of the Mg alloy AZ91 [J]. Corrosion Science,2008,50(7):1939-1953.
- [12] Li H Z, Liu H T, Guo F F, et al. Effect of ageing time on corrosion behavior of Mg-10Gd-4.8Y-0.6Zr extruded-alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2011,21 (7):1498-1505.
- [13] Jiang Q T, Ma X M, Zhang K, et al. Anisotropy of the crystallographic orientation and corrosion performance of high-strength AZ80 Mg alloy [J]. Journal of Magnesium & Alloys,2015,3(4):309-314.

- [14] Jia H, Feng X, Yang Y. Influence of solution treatment on microstructure, mechanical and corrosion properties of Mg-4Zn alloy[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2015, 3(3): 247-252.
- [15] Jiang Q T, Lv X Z, Lu D Z, et al. The corrosion behavior and mechanical property of the Mg-7Y-xNd ternary alloys[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2018, 6(4): 346-355.
- [16] Song G, Bowles A L, Stjohn D H. Corrosion resistance of aged die cast magnesium alloy AZ91D[J]. Materials Science & Engineering A (Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing), 2004, 366(1): 74-86.
- [17] Song G, Atrens A. Understanding Magnesium Corrosion-A framework for improved alloy performance [J]. Advanced Engineering Materials, 2010, 5(12): 837-858.
- [18] Zhao M C, Liu M, Song G L, et al. Influence of pH and chloride ion concentration on the corrosion of Mg alloy ZE41 [J]. Corrosion Science, 2008, 50(11): 3168-3178.
- [19] Shi Z, Cao F, Song G L, et al. Corrosion behaviour in salt spray and in 3.5% NaCl solution saturated with Mg (OH)₂ of as-cast and solution heat-treated binary Mg-RE alloys: RE=Ce, La, Nd, Y, Gd[J]. Corrosion Science, 2013, 76(11): 98-118.
- [20] Abidin N I Z, Martin D, Atrens A. Corrosion of high purity Mg, AZ91, ZE41 and Mg₂Zn_{0.2}Mn in Hank's solution at room temperature[J]. Corrosion Science, 2011, 53(3): 862-872.
- [21] Cao F, Shi Z, Hofstetter J, et al. Corrosion of ultra-high-purity Mg in 3.5% NaCl solution saturated with Mg (OH)₂ [J]. Corrosion Science, 2013, 75(7): 78-99.
- [22] Zhao M C, Liu M, Song G, et al. Influence of Microstructure on Corrosion of As-cast ZE41 [J]. Advanced Engineering Materials, 2008, 10(1/2): 104-111.
- [23] Song G. Recent progress in corrosion and protection of magnesium alloys[J]. Advanced Engineering Materials, 2010, 7(7): 563-586.
- [24] Nam N D, Mathesh M, Le T V, et al. Corrosion behavior of Mg-5Al-xZn alloys in 3.5wt% NaCl solution [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 616: 662-668.
- [25] Gomes M P, Costa I, Pebere N, et al. On the corrosion mechanism of Mg investigated by electrochemical impedance spectroscopy[J]. Electrochimica Acta, 2019, 306: 61-70.
- [26] Qiao Z X, Shi Z, Hout N, et al. Corrosion behaviour of a nominally high purity Mg ingot produced by permanent mould direct chill casting[J]. Corrosion Science, 2012, 61: 185-207.
- [27] Cao F, Shi Z, Hofstetter J, et al. Corrosion of ultra-high-purity Mg in 3.5%NaCl solution saturated with Mg-(OH)₂[J]. Corrosion Science, 2013, 75: 78-99.
- [28] Cao F, Shi Z, Song G L, et al. Influence of casting porosity on the corrosion behaviour of Mg_{0.1}Si [J]. Corrosion Science, 2015, 94: 255-269.
- [29] Jiang B, Xiang Q, Atrens A, et al. Influence of crystallographic texture and grain size on the corrosion behaviour of as-extruded Mg alloy AZ31 sheets [J]. Corrosion Science, 2017, 126: 374-380.
- [30] 周玉. 材料分析方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [31] Niu H Y, Deng K K, Cao F F, et al. Microstructure, mechanical properties and corrosion properties of Mg-4Zn-xNi alloys for degradable fracturing ball applications [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 787: 1290-1300.
- [32] 周玉, 武高辉. 材料分析测试技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998.
- [33] Li C Q, Xu D K, Chen X B, et al. Composition and microstructure dependent corrosion behaviour of Mg-Li alloys [J]. Electrochimica Acta, 2017, 260: 55-64.
- [34] Liu M, Zanna S, Ardelean H, et al. A first quantitative XPS study of the surface films formed, by exposure to water, on Mg and on the Mg-Al intermetallics: Al₃Mg₂ and Mg₁₇Al₁₂ [J]. Corrosion Science, 2009, 51(5): 1115-1127.
- [35] Zhan X Q, Shang W, Wen Y Q, et al. Preparation and corrosion resistance of a three-layer composite coatings on the Mg alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 774: 522-531.
- [36] 贾素秋. 镁合金的腐蚀行为与防护[D]. 吉林: 吉林大学, 2006.
- [37] 刘道新. 材料的腐蚀与防护[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006. 

(上接第 7 页)

- [61] Zhang Y, Schwen D, Bai X. Molecular dynamics simulations of concentration-dependent defect production in Fe-Cr and Fe-Cu alloys [J]. Journal of Applied Physics, 2017, 122 (22): 225902.
- [62] Malerba L, Terentyev D, Olsson P, et al. Molecular dynamics simulation of displacement cascades in Fe-Cr alloys [J]. Journal of Nuclear Materials, 2004, 329-333: 1156-1160.
- [63] Terentyev D A, Malerba L, Chakarova R, et al. Displacement cascades in Fe-Cr: A molecular dynamics study [J]. Journal of Nuclear Materials, 2006, 349(1/2): 119-132.
- [64] Liu Z, Li Y, Shi D, et al. Reprint of: The development of cladding materials for the accident tolerant fuel system from the Materials Genome Initiative [J]. Scripta Materialia, 2018, 143: 129-136.
- [65] Kuksenkov V, Pareige C, Pareige P. Cr precipitation in neutron irradiated industrial purity Fe-Cr model alloys [J]. Journal of Nuclear Materials, 2013, 432(1/3): 160-165.
- [66] Tissot O, Pareige C, Mathon M H, et al. Comparison between SANS and APT measurements in a thermally aged Fe-19at% Cr alloy [J]. Materials Characterization, 2019, 151: 332-341.
- [67] Soisson F, Meslin E, Tissot O. Atomistic modeling of α' precipitation in Fe-Cr alloys under charged particles and neutron irradiations: Effects of ballistic mixing and sink densities [J]. Journal of Nuclear Materials, 2018, 508: 583-594.
- [68] Harrison R W, Carruthers A W, Hinks J A, et al. Cascade size and dose rate effects on α' precipitation in ion-irradiated Fe₁₄Cr alloy[J]. Scripta Materialia, 2019, 172: 33-37.
- [69] Bhattacharya A, Meslin E, Henry J, et al. Chromium enrichment on the habit plane of dislocation loops in ion-irradiated high-purity Fe-Cr alloys[J]. Acta Materialia, 2014, 78: 394-403. 