

## LBE 腐蚀对 316L 纤维毡拉伸性能的影响

李文凯<sup>1,2</sup>, 周小娇<sup>1,2</sup>, 黄 华<sup>1</sup>, 高 胜<sup>1</sup>

(1. 中国科学院核能安全技术研究所中子输运理论与辐射安全重点实验室, 安徽合肥 230031;  
2. 中国科学技术大学核科学技术学院, 安徽合肥 230027)

**摘要:**基于中国铅基研究堆 CLEAR-I 高温运行环境,研究了过滤材料烧结 316L 纤维毡在氧浓度  $1 \times 10^{-6}$  wt%、温度 500℃、静态铅铋合金(lead bismuth eutectic, LBE)中腐蚀不同时间后拉伸性能的变化规律.结果表明,在腐蚀 500 h、1000 h、1500 h 后,纤维毡的抗拉强度分别下降至原始纤维毡的 67%、33% 和 15%,其主要原因是本实验条件下,LBE 腐蚀导致烧结结点结合强度的下降和纤维丝丝径的减小.微观结构分析表明,316L 纤维丝表面形成一层不断增厚的致密  $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{O}_4$  尖晶石氧化膜,该氧化膜形成与生长降低了纤维丝之间结点的结合强度,同时减小了纤维丝的有效丝径,进而导致纤维毡整体抗拉强度的下降.

**关键词:**铅铋合金;烧结 316L 纤维毡;腐蚀;抗拉强度

**中图分类号:** TL34      **文献标识码:** A      doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2017.06.006

**引用格式:** 李文凯,周小娇,黄华,等. LBE 腐蚀对 316L 纤维毡拉伸性能的影响[J]. 中国科学技术大学学报, 2017, 47(6):485-490.

LI Wenkai, ZHOU Xiaojiao, HUANG Hua, et al. Effects of corrosion on tensile property of 316L fiber felt in lead bismuth eutectic[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2017, 47(6):485-490.

## Effects of corrosion on tensile property of 316L fiber felt in lead bismuth eutectic

LI Wenkai<sup>1,2</sup>, ZHOU Xiaojiao<sup>1,2</sup>, HUANG Hua<sup>1</sup>, GAO Sheng<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Neutronics and Radiation Safety, Institute of Nuclear Energy Safety Technology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. School of Nuclear Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** Based on the operation environment of China Lead-based Research Reactor (CLEAR-I), the tensile properties of filter material-sintered 316L fiber felt exposed to stagnant lead bismuth eutectic (LBE) with  $1 \times 10^{-6}$  wt% oxygen concentration was investigated at 500℃ for 500 h, 1000h, 1500 h. The results showed that compared to the original fiber felt, the tensile strength of the fiber felts decreased to 67%, 33% and 15% after 500 h, 1000 h and 1500 h, respectively. It was found that the binding strength of the joints and diameter of 316L stainless steel fibers gradually decreased with exposure time due to the compact single-layer  $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{O}_4$  spinel formation on 316L fibers, which was the main cause of tensile

收稿日期:2016-12-01;修回日期:2017-04-21

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDA03040000),国家自然科学基金(11605229)资助.

作者简介:李文凯,男,1990年生,硕士.研究方向:铅冷快堆冷却剂工艺技术. E-mail:leekai@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:黄华,博士/助理研究员, E-mail:corey@mail.ustc.edu.cn

strength of sintered 316L fiber felt dropping after LBE corrosion.

**Key words:** lead bismuth eutectic; sintered 316L fiber felt; corrosion; tensile strength

## 0 引言

铅铋冷却反应堆是以铅铋共晶合金 (lead-bismuth eutectic, LBE) 为冷却剂的快中子反应堆, 因其具有良好的中子学特性、优异的热工水力学特性和固有安全性等特点而成为第四代核能系统国际论坛 (Generation IV International Forum, GIF) 的推荐堆型<sup>[1,2]</sup>。但是, 由于结构材料在铅铋冷却反应堆运行过程中发生腐蚀, 从而导致冷却剂中会产生大量杂质, 这些杂质在低温段沉积后将会影响反应堆内部设备传热传质特性<sup>[3,4]</sup>。因此, 及时有效地去除 LBE 中的杂质, 并控制其化学成分是反应堆安全运行的前提。当前, 国际上普遍认为过滤技术是净化液态铅铋合金中悬浮杂质最有效的方法之一<sup>[5]</sup>。由于该技术利用过滤材料拦截捕获 LBE 中悬浮的杂质, 因此过滤材料的性能是决定过滤净化效果的核心和关键<sup>[6]</sup>。

不锈钢纤维毡是一种三维立体多孔结构的过滤材料, 具有过滤精度高、孔隙率高、强度高、耐高温和寿命长等优点, 是新一代高效金属过滤材料<sup>[7]</sup>。俄罗斯物理与动力工程研究院 (IPPE)<sup>[8]</sup>、法国原子能总署 (CEA)<sup>[9]</sup>、比利时联邦政府核能研究中心 (SCK • CEN)<sup>[10]</sup> 等主要研究机构在其液态重金属 (Pb 或 LBE) 回路中均使用不锈钢纤维毡作为过滤材料。IPPE 的研究表明不锈钢纤维毡在铅回路中净化效率可达到 80~90%<sup>[8]</sup>。当金属过滤材料应用在 LBE 中, LBE 较强的腐蚀作用会影响过滤材料的力学性能<sup>[11]</sup>。但是, 目前国际上主要研究纤维毡在 LBE 中的过滤性能, 缺少 LBE 腐蚀对金属纤维毡力学性能影响的研究。

中科院核能安全技术研究所长期致力于先进反应堆设计和技术研究<sup>[12-17]</sup>, 利用自主设计的 KYLIN 系列铅铋回路, 开展大量液态重金属冷却剂技术方面研究<sup>[18-20]</sup>。基于前期调研, 本工作以 316L 烧结纤维毡为实验材料, 参考中国铅基研究堆 CLEAR-I 运行工况<sup>[21]</sup>, 探究在 500 °C、氧浓度为  $1 \times 10^{-6}$  wt%、静态条件下, LBE 腐蚀不同时间后烧结 316L 纤维毡的拉伸性能变化规律, 实验数据

可为反应堆 CLEAR-I 过滤净化技术研究提供支持。

## 1 实验过程

实验材料选用孔隙率为 78%、过滤精度为 10  $\mu\text{m}$  的烧结 316L 纤维毡 (比利时 Bekipor 公司), 其中纤维丝的丝径为 7~14  $\mu\text{m}$ 。将烧结纤维毡固定在样品槽中, 装入自主设计的静态 LBE 腐蚀实验装置 (图 1)。缓慢升温至 500 °C 后保温, 启动气相氧控装置, 控制 LBE 中氧浓度为  $1 \times 10^{-6}$  wt%, 待腐蚀 500 h、1000 h 和 1500 h 后取出纤维毡样品, 用等比例化学清洗剂 (乙醇、冰醋酸、双氧水, 按体积比 1 : 1 : 1 配置) 去除黏附在纤维毡上的 LBE。

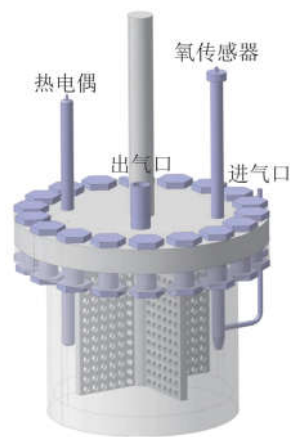


图 1 腐蚀实验装置

Fig.1 Corrosion test device

将清洗后的纤维毡样品剪切成 100 mm × 13 mm × 1 mm 的拉伸试样, 用 Instron-3369 型拉伸试验机进行常温拉伸性能测试, 采用单向拉伸方式, 加载速度为 0.001 mm/s。采用 Zeiss  $\Sigma$ IGMA 场扫描电子显微镜分析纤维毡微观形貌, 并利用 EDS 探头分析腐蚀产物元素组成, 采用 MXPAPHF 型 X 射线衍射仪确定纤维毡表面腐蚀产物物相。

## 2 实验结果

图 2 为腐蚀不同时间后烧结 316L 纤维毡的拉伸应力-应变曲线。由图可见, 原始 316L 纤维毡 (曲线 a) 拉伸断裂过程主要分为 3 个阶段: 弹性阶段、塑性变形阶段和断裂阶段。①弹性阶段, 应力和应变近似成正比, 满足胡克定律, 在较小拉应力的作用

下,纤维毡呈现整体刚性,纤维丝组成的三维空间孔结构骨架发生小变形;②塑性变形阶段,随着拉伸应力的不断增大,蜷曲的纤维丝绕着烧结结点沿着拉伸应力方向发生伸展和塑性变形;③断裂阶段,应力增大到纤维毡的极限应力时纤维毡骨架断裂,拉伸过程中发现断裂过程中并没有发生瞬间断裂,而是先由局部断裂开始,然后扩展直至断裂。

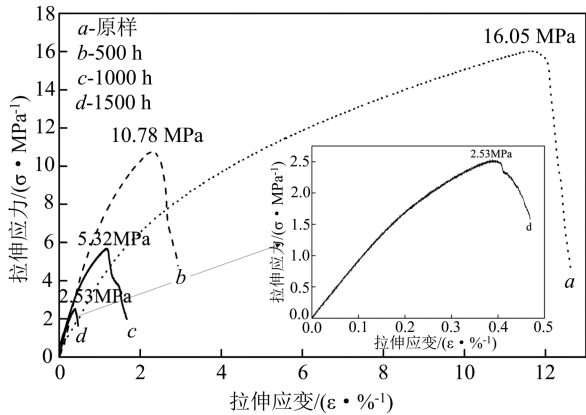


图 2 316L 纤维毡拉伸应力应变曲线

Fig.2 Tensile stress-strain curves of 316L fiber felts

曲线 b、c、d 为腐蚀 500 h、1000 h 和 1500 h 后纤维毡的拉伸应力-应变曲线,由图可见,曲线 b、c、d 和 a 相似,说明腐蚀后纤维毡的断裂过程与原始纤维毡类似,但是拉伸性能出现明显的变化,尤其是抗拉强度.与原纤维毡相比,腐蚀 500 h、1000 h、1500 h 后抗拉强度分别下降至原来的 67%、33%和 15%,表明随着腐蚀时间的增加,纤维毡的抗拉强度出现显著的下降,纤维毡更容易被外力拉断。

### 3 分析与讨论

烧结金属纤维多孔材料的强度控制取决于纤维丝的联结、丝径与材料孔隙度<sup>[22]</sup>.本实验中,316L 纤维毡的孔隙度基本未发生变化,因此抗拉强度的变化主要受纤维丝的联结和纤维丝的丝径影响。

图 3 为不同腐蚀时间后纤维丝间烧结结点的微观形貌.由图可以看出,随着腐蚀时间的增加,烧结 316L 纤维毡中纤维丝之间的烧结结点逐渐遭到破坏.原始纤维毡(图 3a)断裂位置在纤维丝上,而烧结结点没有遭到破坏,说明烧结结点处结合强度大而且高于纤维丝的强度,这与文献<sup>[23]</sup>报道相一致.腐蚀 500 h 纤维毡拉伸断裂后,烧结结点出现大量裂纹(图 3(b)),但没有观察到明显的破坏.腐蚀 1000 h

(图 3(c)) 和 1500 h(图 3(d))纤维毡拉伸后,烧结结点出现显著的破损,表明随着腐蚀时间的增加,纤维丝之间烧结结点的结合强度出现下降.当纤维毡在拉伸应力作用下进入塑性变形阶段时,由于纤维丝之间烧结结点的结合强度下降,在蜷曲纤维丝绕着烧结结点伸展断裂过程中,烧结结点发生断裂,加速纤维毡骨架的破坏,最终出现纤维毡整体抗拉强度的下降。

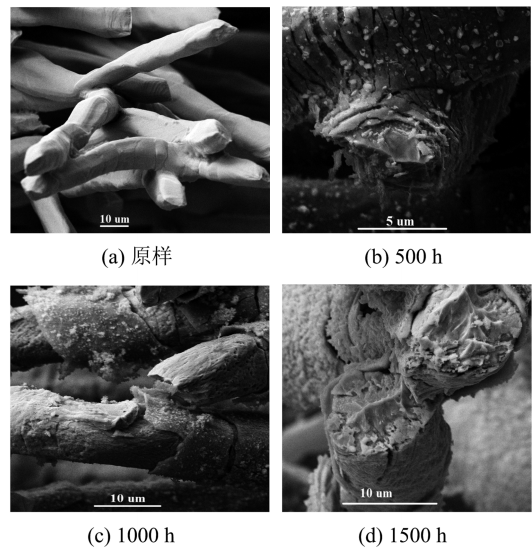


图 3 不同腐蚀时间的纤维毡烧结结点形貌

Fig.3 Morphology of joint points of 316L fiber felts under various corrosion time

图 4 为腐蚀不同时间的 316L 烧结纤维毡 XRD 谱图.由图可知,原始纤维毡的 XRD 图 4(a)只存在奥氏体特征峰,经过 LBE 腐蚀后,出现尖晶石结构

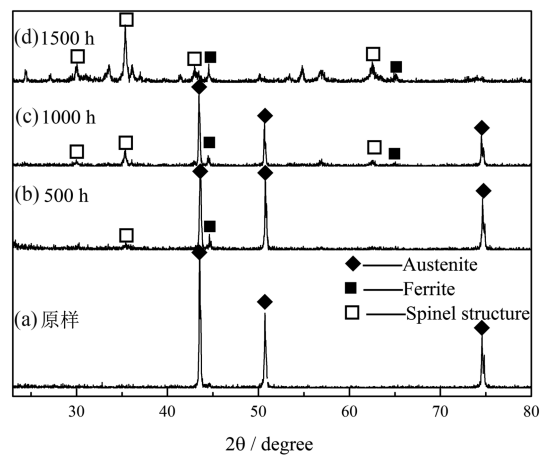


图 4 不同腐蚀时间 316L 烧结纤维毡 XRD 谱图  
Fig.4 X-ray diffraction patterns of 316L fiber felts under various corrosion time

和铁素体衍射特征峰,说明有尖晶石结构物相和铁素体物相生成;同时发现尖晶石结构特征峰强度随腐蚀时间增加而变强,说明随着腐蚀时间增加尖晶石结构物相逐渐增多。

图 5 为 316L 纤维丝在 LBE 中腐蚀不同时间后断裂形貌.由图可知,随着腐蚀时间的增加,纤维丝表面逐渐形成一层致密薄膜,而且薄膜厚度逐渐增加,500 h 后纤维丝表面腐蚀层的厚度约  $0.5 \mu\text{m}$ ,1000 h 后薄膜的厚度约  $0.6 \mu\text{m}$ ,1500 h 后薄膜的厚度约为  $1.1 \mu\text{m}$ .表 1 为不同腐蚀时间的纤维丝腐蚀层能谱分析结果.腐蚀 500 h 后纤维丝表面 B 点 EDS 能谱分析表明,腐蚀层中只含有 Fe、Cr 两种元素,说明腐蚀层中的 Ni 发生了选择性溶解<sup>[24]</sup>,结合图 4(b)中新出现铁素体特征峰,可以判断腐蚀层主要成分为 Fe-Cr 铁素体.腐蚀 1000 h 后薄膜上 C 点能谱分析表明,薄膜主要由 Fe、Cr、O 组成而且 Fe+Cr 与 O 的原子比值为  $3.09:4$  接近  $3:4$ ,结合 XRD 图 4(c)出现的尖晶石结构特征峰,氧化膜的成分为  $(\text{Fe,Cr})_3\text{O}_4$  尖晶石.纤维丝腐蚀 1500 h 后,D 点能谱分析表明薄膜的成分主要是 Fe、Cr、O,而且 Fe+Cr 和 O 的原子比值为  $3.14:4$  接近  $3:4$ ,结合 XRD 图 4(d)强尖晶石特征峰,可以判断薄膜主要成分为  $(\text{Fe,Cr})_3\text{O}_4$ .

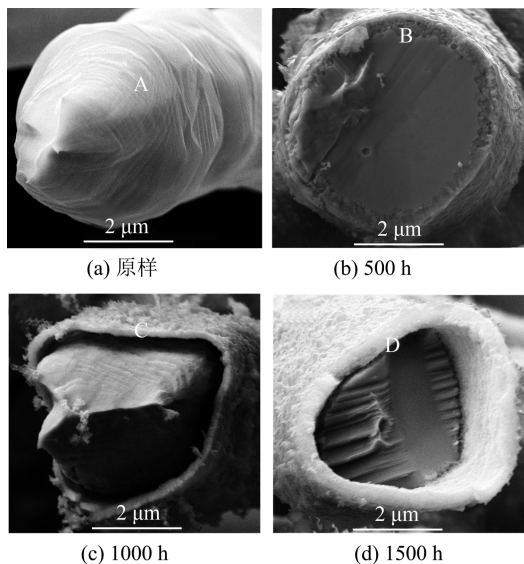


图 5 316L 纤维断裂截面的微观形貌

Fig.5 Micro-morphology of cross-section of 316L fibers

综上,在  $500^\circ\text{C}$ 、氧浓度为  $1 \times 10^{-6} \text{ wt}\%$ 、静态 LBE 中,316L 烧结纤维毡初期部分纤维丝发生溶解腐蚀,表面奥氏体转变为铁素体,随着腐蚀时间的增加,纤维丝表面生成一层致密的氧化膜,成分为尖

晶石氧化物  $(\text{Fe,Cr})_3\text{O}_4$ ,这与文献[25]报道 316L 奥氏体不锈钢在 LBE 中的腐蚀结果是一致的。

表 1 不同腐蚀时间纤维表面 EDS 能谱分析结果(wt%)

Tab.1 Results of EDS analyses of 316L fibers under various corrosion time

腐蚀时间	位置	Fe	Cr	Ni	O	Mo	Si
0 h	A	68.7	18.1	9.8	—	2.9	0.4
500 h	B	77.7	22.3	—	—	—	—
1000 h	C	47.3	25.2	—	27.5	—	—
1500 h	D	37.0	35.6	—	27.4	—	—

[注]—表示未检测到。

通过以上对 316L 纤维毡腐蚀前后样品的微观形貌分析,结果表明,随着腐蚀时间的增加,致密的  $(\text{Fe,Cr})_3\text{O}_4$  尖晶石氧化膜向纤维丝基体内部生长,严重削弱了 316L 纤维丝之间烧结结点的结合度,降低了纤维毡的抗拉强度.烧结结点在液态铅铋环境中逐渐被腐蚀,甚至出现被完全氧化腐蚀的情况,纤维丝基体之间只存在氧化膜联结而不存在纤维丝基体间的联结.显然烧结结点结合度的降低会引起结点强度的下降.在烧结纤维毡拉伸断裂过程中,纤维丝绕着烧结结点发生取向和塑性变形,烧结结点是主要的应力集中位置<sup>[26]</sup>,同时承受着拉伸应力和剪切应力的作用(图 6).在拉伸应力和剪切应力的共同作用下,结合强度下降的烧结结点会加速纤维毡骨架的断裂,出现纤维毡整体抗拉强度下降的现象.而纤维丝表面尖晶石氧化膜呈现脆性<sup>[27]</sup>,由于烧结结点处曲率的变化较大,会存在许多可能的应力集中点,所以结点处氧化膜在外力作用下极易遭到破坏<sup>[28]</sup>.

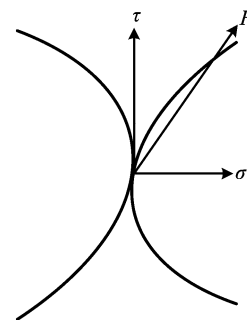


图 6 烧结结点上的作用力

Fig.6 The stress applied on the joint

此外,有研究<sup>[29]</sup>表明 316L 不锈钢纤维丝的抗拉强度会随着丝径的减小而降低.本实验中,随着腐



蚀时间的增加,纤维丝表面的 $(\text{Fe,Cr})_3\text{O}_4$ 尖晶石氧化膜逐渐向基体内部生长,导致纤维基体丝径逐渐变小,进而引起纤维丝抗拉强度的下降.纤维丝抗拉强度的减小也是引起316L纤维毡整体抗拉强度下降的重要原因之一.

## 4 结论

本文研究了孔隙率78%,纤维丝径7~14  $\mu\text{m}$ 的过滤材料烧结316L纤维毡在500 $^{\circ}\text{C}$ 、氧浓度为 $1\times 10^{-6}$  wt%、静态LBE中腐蚀500 h、1000 h、1500 h后拉伸性能的变化规律,主要结果和结论如下:

(I)随着腐蚀时间的增加,烧结316L纤维毡的抗拉强度出现显著的下降.与原纤维毡相比,腐蚀500 h、1000 h和1500 h后强度分别下降至原来的67%、33%和15%.

(II)在氧浓度 $1\times 10^{-6}$  wt%的液态铅铋环境中,腐蚀后烧结316L纤维毡抗拉强度下降的主要原因有两方面,一方面LBE腐蚀导致纤维毡中烧结结点结合强度下降;另一方面LBE腐蚀引起纤维丝丝径的变小.随着腐蚀时间增加,纤维丝表面形成的致密 $(\text{Fe,Cr})_3\text{O}_4$ 尖晶石氧化膜不断增厚,该氧化膜形成与生长降低了纤维丝之间结点的结合强度,同时减小了纤维丝的有效丝径,进而导致了纤维毡整体抗拉强度的下降.

过滤材料的力学性能是评估其在LBE中服役性能和使用寿命的重要参数.本研究为316L纤维毡在LBE环境下的使用提供了重要数据参考,下一步我们将利用铅基堆冷却剂综合实验回路KYLIN-II,研究在实际反应堆运行工况下LBE对烧结316L纤维毡力学性能的影响,以评估316L烧结纤维毡作为铅基堆净化过滤材料的长期工程可行性.

**致谢** 感谢中国科学技术大学理化实验室对本实验表征提供的帮助.感谢FDS团队及其他成员对本实验的帮助.

### 参考文献(References)

[1] OECD Nuclear Energy Agency for the Generation IV International Forum. Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems [R/OL]. [2016-09-10] <https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2014-03/gif-tru2014.pdf>.

[2] ALEMBERTI A, SMIRNOV V, SMITH C F, et al.

Overview of lead-cooled fast reactor activities [J]. Progress in Nuclear Energy, 2014, 77: 300-307.

[3] MARTYNOV P N, ASKHADULLIN R SH, ORLOV YUI, et al. Modern problems and tasks of modern heavy liquid metal coolant technology (lead, lead-bismuth)[C]// IV Conference "Heavy Liquid Metal Coolants in Nuclear Technologies" HLMC-2013, Obninsk, Russia, 2013.

[4] COUROUAU J L, SELLIER S, BALBAUD F, et al. Initial start-up operations chemistry analysis for MEGAPIE[C]// Proceedings of the 5th MEGAPIE Technical Review Meeting, Nantes, France, 2004.

[5] ZRODNIKOV A V, EFANOV A D, ORLOV Y I, et al. Heavy liquid metal coolant-lead-bismuth and lead-technology[J]. Atomic Energy, 2004, 97(2): 534-537.

[6] PURCHAS D B, SUTHERLAND K. Handbook of Filter Media[M]. New York: Elsevier, 2002.

[7] QINGBO A, HUIPING T, JIANZHONGW, et al. Corrosion behavior of sintered 316L stainless steel fiber porous felt[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(10): 2344-2348.

[8] MARTYNOV P N, YAGODKIN I V, ASKHADULLIN R Sh, et al. Filtration purification of heavy liquid metal coolants from impurities[C]// IV Conference "Heavy Liquid Metal Coolants in Nuclear Technologies" HLMC-2013, Obninsk, Russia, 2013.

[9] BEAUCHAMP F, MORIER O, BRISSONNEAU L, Et al. A review of lead-bismuth alloy purification systems with regard to the latest results achieved on STELLA loop[C]// Technology and Components of Accelerator-driven Systems Workshop Proceedings, Karlsruhe, Germany, 2010.

[10] VAN DEN BOSCH J, AERTS A, LIMJ, et al. Overview of the LBE chemistry, conditioning and purification program at SCK-CEN[C]// IV Conference "Heavy Liquid Metal Coolants in Nuclear Technologies" HLMC-2013, Obninsk, Russia, 2013.

[11] ZHANG J. A review of steel corrosion by liquid lead and lead-bismuth[J]. Corrosion Science, 2009, 51(6): 1207-1227.

[12] WU Y, FDS Team. Conceptual design activities of FDS series fusion power plants in China [J]. Fusion Engineering and Design, 2006, 81(23): 2713-2718.

[13] WU Y, FDS Team. CAD-based interface programs for fusion neutron transport simulation [J]. Fusion Engineering and Design, 2009, 84(7): 1987-1992.

[14] WU Y, FDS Team. Conceptual design and testing strategy of a dual functional lithium-lead test blanket module in ITER and EAST[J]. Nuclear Fusion, 2007, 47(11): 1533.

- [15] WU Y, FDS Team. Development of reliability and probabilistic safety assessment program RiskA [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, 83: 316-321.
- [16] WU Y, SONG G, WANG Y, et al. Development of high intensity D-T fusion neutron generator HINEG [J]. *International Journal of Energy Research*, 2016; DOI: 10.1002/er.3572.
- [17] HUANG Q, FDS Team. Development status of CLAM steel for fusion application [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2014, 455(1): 649-654.
- [18] WU Y, SONG J, ZHENG H, et al. CAD-based Monte Carlo program for integrated simulation of nuclear system SuperMC [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, 82:161-168.
- [19] WU Y. CLEAR-S: an integrated non-nuclear test facility for China lead-based research reactor [J]. *International Journal of Energy Research*, 2016, 40 (14): 1951-1956.
- [20] WU Y, XIE Z, FISCHERU. A discrete ordinates nodal method for one-dimensional neutron transport calculation in curvilinear geometries [J]. *Nuclear Science and Engineering*, 1999, 133(3): 350-357.
- [21] WU Y. Design and R&D progress of China lead-based reactor for ADS research facility [J]. *Engineering*, 2016, 2(1): 124-131.
- [22] 刘怀礼,王建忠,汤慧萍. 不锈钢纤维多孔材料拉伸性能研究 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2014, 43(8): 2023-2026.  
LIU Huali, WANG Jianzhong, TANG Huiping. Tensile properties of stainless steel fiber porous materials [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2014, 43(8):2023-2026.
- [23] 奚正平,汤慧萍. 烧结金属多孔材料(精) [M]. 北京:冶金工业出版社,2009:254-255.
- [24] 田书建,张建武. 316L 和 T91 不锈钢在 550℃ 静态铅铋合金中的腐蚀行为 [J]. *中国科学技术大学学报*, 2015, 45(9):751-756.  
TIAN Shujian, ZHANG Jianwu. Corrosion behavior of 316L and T91 steels in stagnant lead-bismuth eutectic at 550 °C [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2015, 45(9):751-756.
- [25] FAZIO C, SOBOLEV V P, AERTSA, et al. Handbook on Lead-bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermal-hydraulics and Technologies-2015 Edition [R]. Organization for Economic Co-Operation and Development, 2015.
- [26] 李美栓. 金属的高温腐蚀 [M]. 北京:冶金工业出版社, 2001:196-200.
- [27] BO Z, WEI Y, HU J, et al. Uniaxial tensile behavior of porous metal fiber sintered sheet [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(6): 2003-2008.
- [28] 钱余海,李美栓,张亚明. 氧化膜开裂和剥落行为 [J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2003,15(2):90-93.  
QIAN Yuhai, LI Meishuan, ZHANG Yaming. Cracking and spalling behavior of thin oxide scale [J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2003,15 (2):90-93.
- [29] 刘大彪,何玉明,胡鹏,等. 单纤维微拉伸力学性能测试与分析 [J]. *实验力学*, 2012,27(1):61-69.  
LIU Dabiao, HE Yuming, HU Peng, et al. On the mechanical properties in micro-tensile testing of single fiber [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2012,27 (1):61-69.