

聚变材料研究的现状和展望

许增裕

(核工业西南物理研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 概要介绍了国际上聚变材料研究的发展趋势、有待解决的关键问题和创新概念以及国内聚变材料研究的状况。

关键词: 结构材料; 面对等离子体材料; 包层材料

中图分类号: TL627

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2003)S0-0105-06

Status and Expectation of Fusion Materials Research and Development

XU Zeng-yu

(Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: It is introduced that the tendency of fusion materials research and development in the world, including key issues and innovation concept and China fusion materials research progress.

Key words: structure materials; plasma facing materials; blanket materials

目前 ITER (international thermal-nuclear experimental reactor) 已完成行缩小预算 50% 的工程设计, 进入选址建造阶段^[1]。之后, 国际聚变材料辐照装置 (简称 IFMIF) 也将启动建造程序。IFMIF 是聚变能从研究走向商业化的一座桥梁, 也是聚变材料研究的一个里程碑^[2]。聚变能作为未来永久的、洁净的能源将是无可置疑的。

聚变材料的工程可行性时限将决定着聚变能源商业化时限^[3,4]。目前, 现有的材料很难满足未来聚变堆高温、高压和强中子辐照的苛刻条件。所以, 聚变材料研究面临的任务是开

发高性能的新型材料和探索大大提高现有材料性能的途径。聚变材料涉及到结构材料 (包括防氚渗透涂层)、面对等离子体材料、中子倍增材料、氚增殖材料、绝缘材料、窗口材料和光纤材料等。本文将概述以上各种材料的发展趋势, 着重分析今后的发展方向和有待解决的关键问题。

1 结构材料

结构材料的选择与包层系统的氚增殖剂、冷却剂和中子倍增材料密切相关^[1,2]。聚变堆第一壁/包层候选方案列于表 1。

收稿日期: 2003-01-22; 修回日期: 2003-03-07

作者简介: 许增裕 (1961—), 男, 福建永春人, 研究员, 电子物理专业

表 1 聚变堆第一壁/包层候选系统

Table 1 Candidate system of fusion first wall/blanket

结构材料	氦增殖材料	冷却剂	中子倍增材料	面对等离子体材料	其他材料
铁素体/马氏体	锂-铅	氦	铅	碳基材料	绝缘材料
钒合金	锂	锂	铍	铍	氦阻挡材料(T-Barrier)
碳化硅/碳化硅	锂陶瓷	水	铍	钨	氦阻挡材料
铜合金	融盐(FLiBe)	融盐(FLiBe)			

在使用寿命期限内结构材料应保持化学稳定性和尺寸稳定性,即与氦增殖剂、冷却剂、中子倍增材料和面对等离子体材料兼容,并抗中子辐照。IEA 聚变材料执行委员会最新确定的候选结构材料:铁素体/马氏体钢,近期目标可行性更大;钒合金,中期目标较好;碳化硅/碳化硅作为长远目标更为适宜。这些候选结构材料的总体性能的比较^[4,9~14]列于表 2;几种候选材料的部分性能参数比较列于表 3。

上述所列候选结构材料有待解决的关键问题如下。

1) 铁素体/马氏体钢

辐照对硬度、脆性和延-脆转变温度(DBTT)的影响;磁效应对等离子体稳定性的影响;蠕变断裂强度;氧化物弥散增强材料。

2) 钒合金

氦、氦滞流和脆性问题;与液态金属和氦(氦气中的氧和氮杂质)的相容性;辐照对硬度、脆性和延-脆转变温度(DBTT)的影响;涂层研制。

3) SiC/SiC 复合材料

提高热导率(包括辐照问题);在辐照环境中的长期稳定性问题(氦对纤维和基底的影响);异端行为(如层间滑移等);制造技术(包括连接/焊接技术);固有脆性问题(材料设计问题)。

4) 钛合金

氦、氦滞流和脆性问题;中子辐照行为;热导率改善。

表 2 候选结构材料总体性能比较

Table 2 Properties comparison of candidate structural materials

材料	有利因素	不利因素
奥氏体不锈钢 (亦为首批候选材料 PCA)	丰富的核应用数据库 好的制造和焊接性能 抗氧化性能好 可优化的抗辐照肿胀性能	低热应力因子 抗液态金属腐蚀性能不好 运行温度较低 抗辐照蠕变性能差,存在水应力腐蚀效应
铁素体/马氏体钢(如 HT-9)	较好的热应力因子 较好的液态金属相容性 较好的抗辐照肿胀性能	缺乏辐照性能数据库 焊接要求高,铁磁效应 延-脆转换温度高于室温,运行温度亦不高
钒合金(VCrTi)	较高的运行温度 好的热应力因子 好的液态金属相容性 好的中子特性(低活性)	缺乏辐照性能数据库 制造和焊接困难 易氧化 经济性不好
碳化硅/碳化硅复合材料 (SiC/SiC)	高运行温度 高强度,热稳定性好 低电磁载荷 更好的中子特性(更低活性)	缺乏数据库 制造和加工困难 连接、密封问题 热导率低,经济性差

表3 几种候选结构材料的部分性能参数
Table 3 Part properties for several candidate structural materials

材料	熔点/°C	密度/(g·cm ⁻³)	热导率/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	电阻率/ (μΩ·m)	10 ⁶ 热胀系数/ K ⁻¹	弹性模量/ GPa
PCA	1400	8.0	19.50	1.01	17.60	168
HT-9	1420	7.8	26.50	0.91	11.80	190
VCrTi	1890	6.2	78.00	0.74	10.30	118
SiC/SiC ¹⁾	2700	2.8	15~17	0.1~1.0(Ω·cm)	4.0	250
(C纤维)						
材料	与锂和铯-铅相容性/°C	最高运行温度/°C	延-脆转变温度/°C	设计极限应力/MPa		
PCA	430~470	550	<室温	205(500 °C)		
HT-9	535~580	550	>125	175(500 °C)		
VCrTi	>750	>750	>室温(辐照后)	175(500 °C)		
SiC/SiC ¹⁾	1 000 以下	900~1 100		300(900~1 100 °C)		
(C纤维)						

注:1) 所列性能数值为理论预期值

2 面对等离子体材料(PFM)

PFM是聚变堆至关重要的材料之一,它关系到等离子体的稳定性及第一壁结构材料和元件免受等离子体轰击损伤问题。它的主要功能为:1)有效控制进入等离子体的杂质;2)有效移走辐射到材料表面的热功率;3)保护非正常停堆时其它部件免受等离子体轰击而损坏。同时,PFM应与堆运行寿命、可靠性和维护相一致。因此,对PFM的总体要求是耐高温、低溅射、低氢(氘)滞留及与结构材料兼容。PFM主要有碳基材料(石墨,C/C复合材料)、铍和钨等,为了提高材料抗等离子体辐照性能,还可在材料表面喷涂碳化硅和碳化钛涂层。低原子序数可减少杂质对等离子体稳定性的影响。它们在600 °C下的基本性能列于表4^[9~14]。

这几种材料有待解决的关键问题如下。

1) 碳基材料

化学溅射和辐照增强升华的抑制;辐照后氘的滞留和释放行为;与结构材料的连接技术。

2) 铍

制造技术(杂质控制,性能对杂质极为敏感);与结构材料的连接技术;中子辐照行为。

3) 钨

细化晶粒;与结构材料的连接技术;中子辐照行为。

铍、钨的中子辐照行为、与铜合金焊接,主要是欧洲、俄罗斯和日本对此进行研究,日本还在碳基材料方面作了很多工作,如氢在碳基材料的滞留和释放,辐射增强升华行为等。

表4 几种面对等离子体材料基本性能参数(600 °C)
Table 4 The basic properties of several PFMs(600 °C)

材料	原子数	熔点/°C	密度/ (g·cm ⁻³)	热导率/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	10 ⁶ 热胀系 数/K ⁻¹	弹性模量/ GPa	运行温度/ °C	自溅射率 (1 000 °C)	氘滞留量 ¹⁾ / %
石墨	6		1.8~2.1	90~300	4.5	8.1~28.0	RT~2 000	>1	>1(辐照后)
C/C复合材料	6		1.8	155~400	3.6~7.8	11.3	RT~2 000	>1	>1(辐照后)
Be	4	1 284	1.85	96	18.4	290	RT~1 000	<1	<1
W	74	3 400	19.25	176	4.2	379	RT~1 000	>1(>100 eV)	

注:1) 以原子百分数计

碳基材料或许仍是未来聚变装置的主导面对等离子体材料;如能克服钨的脆性(细化晶粒)和控制其自溅射能量低于 100 eV,它也将是很好的面对等离子体材料。

3 氚增殖剂

氚增殖剂有固态增殖剂(如 Li_2O , Li_2TiO_3 , Li_2ZrO_3 , Li_4SiO_4 和 LiAlO_2 等)和液态增殖剂(如 Li , Li-Pb , FLiBe 和 Li-Sn)两大类。固态增殖剂已被广泛、深入研究,有丰富的数据库。 Li_2TiO_3 有更均匀的氚分布和热效应,更好的材料制备和储存及运输特性,是最近提出的更有潜力的固态增殖剂。目前已较少考虑将 LiAlO_2 作为候选氚增殖材料。液态增殖剂以其热导率好、低压运行和结构设计简单等特点而具有一定的吸引力,主要进行研究的国家有美、德和俄罗斯等,但未进行深入研究。 Li-Sn 是今年最新提出的具有良好特性的液态增殖剂。表 5 和表 6 分别列出了部分固态增殖剂和液态增殖剂的性能参数^[5~8,9~14]。

尚需继续研究的关键问题如下。

1) 固态增殖剂

就材料制备技术而言,湿度对锂氧化物含量的增加及比表面积增加极为敏感,而 Li_2TiO_3 则对湿度不敏感,显示出良好的制备、

储存和运输特性。性能测试涉及热循环、热冲击和抗脆裂性能,加入 SiO_2 和 TeO_2 可提高抗脆裂性能。氚的释放特性不能以简单地增加氘中氢分量来提高氚的释放,它与 Li_2O 的晶向有关。中子辐照行为是有待继续研究的另一关键问题。

2) 液态增殖剂

涉及与结构材料的相容性和防氚渗透,氚的提取,磁流体动力学效应等关键问题。

4 绝缘材料、窗口材料和光纤材料^[9~14]

1) 绝缘材料

有关对 Al_2O_3 、 MgO 、 MgAl_2O_4 和 BeO 等绝缘材料的专门研究还较少,尤其是在外加电磁场中受中子辐照后的电性能的退降,目前尚不十分清楚。总的来说, MgAl_2O_4 的性能好于 Al_2O_3 , BeO 的性能是最差的。

2) 窗口材料

石英晶体,用于远红外区;锌硒化合物(ZnSe),用于红外区;融合二氧化硅(Fused silica, SiO_2),用于可见光和近紫外区;蓝宝石(Sapphire)和氟化镁,用于紫外区。目前对窗口材料的专门研究比较少。所关心的问题是,中子辐照后部件变形以及微小变形引起的组件的高应力。

表 5 几种固态增殖剂性能参数

Table 5 Parameters of several solid breeders

材料	熔点/°C	热导率/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	10^6 热胀系数/ K^{-1}	杨氏模量/GPa	抗压强度/MPa	1 d 氚滞留的 温度/°C
Li_2O	1 432	3.58	1.5	60.7	28.4	325
Li_4SiO_4	1 255	0.82	1.41	48.2		388
Li_2ZrO_3	1 695	1.42	0.57	77.3		319
LiAlO_2	1 750	2.83	0.62	70.5	39.6	469

注:在 600 °C 下相对密度(实际密度与理论密度之比)为 80%、晶粒直径为 10 μm 、 ^6Li 丰度为 90% 的固体增殖剂

表 6 几种液态增殖剂性能参数

Table 6 Parameters of several liquid breeders

材料	熔点/°C	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	热胀系数/%	潜热/($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	热导率/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
Li	181	0.518	1.5	66.2	42
$\text{Li}_{17}\text{Pb}_{83}$	235	8.98	3.5	33.9	13
Li_2BeF_4	459	2.0			1.0

3) 光纤材料

光纤材料主要用于诊断和遥控设备。与其它玻璃类型光纤相比, SiO_2 基的光纤更稳定, 对辐照不甚敏感。辐照诱导的色中心不能被消除, 但可预期和控制。所关心的是, 辐照后引起的自发射及辐照对光在光纤中传播的影响。

近几年来, 绝缘材料、窗口材料和光纤材料主要由日本的一些大学和研究所进行一些相关的辐照行为研究, 研究结果有限。

5 创新概念

由于聚变堆环境条件的苛刻, 很难研制出能经受住高温、高压和聚变中子辐照而性能又能满足堆的要求且经济可行的材料。因此, 人们在思考能否改变传统观念, 寻找一种使材料免受高温疲劳断裂、中子辐照引起的性能退降等原因造成的材料失效和易于维护的设计方案。液态自由表面、无固体第一壁、液态偏滤器和液态限制器等一组创新概念应运而生。它克服了固体块材的中子辐照性能退降、使用寿命短、更换困难等缺点, 可方便地通过循环处理更新加以解决。

目前, 主要有 3 种类型方案^[8,12,13]: 1) 帘幕式(颗粒帘和液帘, 薄帘和厚帘); 2) 连续流动表面; 3) 毛细管产生表面液膜。在这些方案中首先考虑的主要问题有: 1) 荷能粒子与表面作用力过程中粒子在液体或固体颗粒中的滞留; 2) 高效排除滞留粒子的系统; 3) 表面及时更新; 4) 表面蒸发气体的气体动力学效应; 5) 与等离子体的相互作用; 6) 与其它材料的相容性。

目前的研究尚处于概念提出阶段, 有待进行进一步的理论和实验研究。

6 聚变材料研究现状及总体趋势

在“863”项目的支持下, 已研制出了国产 CHT-9、CHT-7、ODS 铁素体钢、VCrTi 合金及 SiC/SiC 复合材料试样和十几种掺杂石墨和掺杂 C/C 复合材料; 进行了梯度材料研究(高热负荷部件技术); 防氚渗透薄膜开发; 开展了液态增殖剂相关问题研究^[15]。在掺杂石墨和掺杂 C/C 复合材料研究方面, 采用多元掺杂

(B_4C , Ti, Si), 在抑制溅射和抗热冲击断裂方面取得了很好效果。总的来说, 我国尚处于基础研究的试样水平阶段, 而国际上的聚变材料研究已侧重于材料的开发、工程实验数据的获取和积累。低活性材料使得聚变能更清洁, 更符合环境要求, 从长远角度看, 也更为经济(减少后处理费用), 它是材料发展的方向。聚变材料研究发展目标是: 开发新材料, 提高材料性能; 理解材料在堆环境中的行为和行为结果; 建立材料数据库, 为反应堆工程设计提供所需数据。

国际上的聚变材料研究, 将随着 IFMIF 的建造, 通过国际合作在低活性材料, 如铁素体钢和 SiC/SiC 复合材料提高抗辐照性能方面取得进展; 其他绝缘材料和 PFM 的抗辐照性能研究也将全面展开; 新概念液态自由表面的研究将进入系统模块研究阶段。

参考文献:

- [1] Victor M, Wiffen FB, Seki M. National Fusion Materials Program of EU, US and Japan[A]. 19th ~ 24th IEA Fusion Materials Executive Committee Meeting[C]. Germany: IEA, 2001. 10~50.
- [2] Youngblood GE, Jones RH. A New Type of SiC Composite for Fusion—Fusion Materials Semi-annual Progress Report for Period Ending[R]. USA: DOE/ER, 2000.
- [3] Rou XN, Tanaka S, Johnson C, et al. Ceramic Breeder Material Development[J]. Fusion Engineering and Design, 1998, 39-40B: 31~38.
- [4] Smith DL, Chung HM, Mastui H, et al. Progress in Vanadium Alloy Development for Fusion Applications[J]. Fusion Engineering and Design, 1998, 39-40B: 7~20.
- [5] Jones RH, Sneed LL, Kohyama A, et al. Recent Advances in the Development of SiC/SiC as a Fusion Structural Materials[J]. Fusion Engineering and Design, 1998, 39-40B: 15~23.
- [6] Giancarli L, Benamati G, Futterer M, et al. Development of the EU Water-cooled Pb-17Li Blanket[J]. Fusion Engineering and Design, 1998, 39-40A: 639~644.
- [7] Miriyama H, Sagara A, Tanaka S, et al. Molten Salts in Fusion Nuclear Technology[J]. Fusion Engineering and Design, 1998, 39-40A: 627~

- 635.
- [8] Skolov YA, Atovskij IV, Borisov AA, et al. Russian DEMO Plant Study[J]. Fusion Engineering and Design, 1998,39-40B;525~531.
- [9] Smith DL, Billonne MC. Materials Integration Issues for High-performance Fusion Power System[A]. Proceedings of IEA Workshop on V-alloy Development [C]. Sendai, Japan; IEA, 1997. 17~33.
- [10] Klueh RL. Summary of Workshop/working Group Meeting on Ferritic/Martensitic Steel for Fusion [A]. Proceedings of IEA Workshop/working Group Meeting on Ferritic/Martensitic Steel[C]. Oak Ridge, Tennessee, USA; IEA, 1998,109~194.
- [11] Tavassoli A-AF. Present Limits and Improvement of Structural Materials for Fusion Reactors [J]. J Nucl Mater, 2000, 283-287;73~78.
- [12] Taylor NP, Forty CB, Petti DA, et al. The Impact of Materials Selection on Long-term Activation[J]. J Nucl Mater, 2000,135-142;20~28.
- [13] Mattas RF. ALPS——Advanced Limiter-divertor Plasma-facing System[J]. Fusion Engineering and Design, 2000, 51-52;127~134.
- [14] Cahn RW, Haasen P, Kramer EJ. Materials Science and Technology[M]. Germany: VCH Verlagsgesellschaft mbH,1995.245~339.
- [15] 许增裕,刘翔,湛继明,等.863聚变工艺与材料研究15年成果简介;CNIC-01622[R].北京:中国核工业音像出版社,2002.

(上接第 87 页, From p. 87)

3) 新锆合金的耐蚀性能与微观组织,尤其是第二相的分布、尺寸、结构密切相关,欲获得理想的性能,基体中第二相粒子细小、弥散、均匀是非常重要的。

参考文献:

- [1] Sabol GP, Kilp GR, Balfour MG, et al. Zirconium in the Nuclear Industry[A]. 8th Int Symp; ASTM STP1023 [C]. Philadelphia: ASTM, 1989. 227~224.
- [2] Nikulina AV, Bibilashvili YK, Markelov PP, et al. Zirconium in the Nuclear Industry[A]. 11th Int Symp; ASTM STP1295 [C]. Philadelphia: ASTM, 1996. 785~804.
- [3] Mardon P, Charquet D, Senevat J, et al. Update on the Development of Advanced Zirconium Alloys for PWR Fuel Rod Claddings[M]. Portland; ANS, 1991. 405~412.
- [4] Li Zhongkui, Zhou Lian, Li Cong, et al. Microstructure Characteristic of Zr-Sn-Nb Alloy[A]. Proc Int Conf Eng Technol Sci 2000, Session 3, Adv Mater, Vol 1 [C]. Beijing: New World Press, 2000. 395~398.