

中国低活化马氏体钢 CLAM 研究进展

黄群英¹, 李春京¹, 李艳芬¹, 刘少军¹, 吴宜灿¹,
 李建刚¹, 万发荣², 巨新², 单以银³, 郁金南⁴, 朱升云⁴,
 张品源⁴, 杨建锋⁵, 韩福生⁶, 孔明光⁶, 李合琴⁷, 室贺健夫⁸, 长坂琢也⁸

- (1. 中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031; 2. 北京科技大学, 北京 100083;
 3. 中国科学院金属研究所, 辽宁 沈阳 110016; 4. 中国原子能科学研究院, 北京 102413
 5. 西安交通大学, 陕西 西安 710000; 6. 中国科学院固体物理研究所, 安徽 合肥 230031;
 7. 合肥工业大学, 安徽 合肥 230000; 8. 日本国立聚变研究所, 日本 岐阜 土岐 509-5292)

摘要:低活化铁素体/马氏体钢(RAFM 钢)被普遍认为是未来聚变示范堆和聚变动力堆的首选结构材料。国际上给予了高度重视,许多国家都在研发其特有的 RAFM 钢。中科院等离子体物理研究所在与国内外多家单位的合作下发展了中国低活化马氏体钢——CLAM。本文总结了 CLAM 钢研制发展的主要进展,包括其成分优化设计、冶炼加工制备工艺、物理性能、机械性能、辐照性能及与液态 LiPb 的相容性等测试与研究以及各种焊接工艺研究等,并对今后的发展方向进行了展望。

关键词:聚变堆;低活化材料;CLAM 钢;性能测试

中图分类号:TL627 **文献标识码:**A **文章编号:**0258-0918(2007)01-0041-10

R&D status of China low activation martensitic steel

HUANG Qun-ying¹, LI Chun-jing¹, LI Yan-fen¹, LIU Shao-jun¹,
 WU Yi-can¹, LI Jian-gang¹, WAN Fa-rong², JU Xin², SHAN Yi-yin³, YU Jin-nan⁴,
 ZHU Sheng-yun⁴, ZHANG Pin-yuan⁴, YANG Jian-feng⁵, HAN Fu-sheng⁶,
 KONG Ming-guang⁶, LI He-qin⁷, T. Muroga⁸, T. Nagasaka⁸

- (1. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei of Anhui Prov. 230031, China;
 2. University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
 3. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang of Liaoning Prov. 110016, China;
 4. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;
 5. Xi'an Jiaotong University, Xi'an of Shaanxi Prov. 710049, China;
 6. Institute of Solid State Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei of Anhui Prov. 230031, China;
 7. Hefei University of Technology, Hefei of Anhui Prov. 230000, China;
 8. National Institute for Fusion Science, Toki, 509-5292, Japan)

收稿日期:2006-11-07;修回日期:2007-01-09

基金项目:国家自然科学基金项目(10375067、10675123);中科院知识创新工程项目;973 计划项目

作者简介:黄群英(1964—),女,河南人,研究员,博导,主要从事反应堆设计及核材料等方面研究工作

Abstract: The Reduced Activation Ferritic/Martensitic (RAFM) steel is considered as the primary candidate structural material for DEMO and the first fusion plant, and widely studied in the world. China low activation martensitic steel (CLAM) is being developed in Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, under wide collaboration with many other domestic and foreign institutes and universities. This paper summarized the main R&D progress on CLAM, which covered composition optimization of the CLAM, smelting and processing techniques, physical and mechanical property test and evaluation before and after irradiation, compatibility with liquid LiPb, welding techniques etc. Finally, further research and development, and the prospects on its application were stated.

Key words: fusion energy; low activation structural material; CLAM; property test

低活化铁素体/马氏体钢(RAFM)具有较低的辐照肿胀和热膨胀系数、较高的热导率等优良的热物理、机械性能,以及相对较为成熟的技术基础,因此被普遍认为是未来聚变示范堆和聚变动力堆的首选结构材料。目前世界各国均在发展和研究各自的 RAFM 钢,如日本的 F82H 和 JLF-1,欧洲的 EUROFER97 以及美国的 9Cr-2WVTa 等^[1-3]。

为了赶上国际聚变堆研究形势发展的步伐,适应即将建造的国际热核聚变实验堆(ITER)实验包层模块(TBM)和未来动力示范堆发展的需要,从 2001 年开始,中科院等离子体物理研究所 FDS(Fusion Design Study)团队在国家自然科学基金、中科院知识创新工程、973 计划等项目的支持下与国内外多家研究所和大学,如北京科技大学、中国原子能科学研究院、中科院金属研究所、日本国立聚变科学研究所、西安交通大学等单位合作下,开展了对中国低活化马氏体钢—CLAM (China Low Activation Martensitic) 钢的设计与研究^[4-6],以发展具有中国自主知识产权的、成分及性能优化的 RAFM 钢。近几年来 CLAM 钢研究取得了较大的进展,现在已经发展到几百公斤/吨级的冶炼水平,性能与国外已经发展多年的 RAFM 钢(如 EUROFER97、JLF-1 等)的性能相当^[4]。

另外,从 20 世纪 90 年代起,中国开展了 FDS 系列的聚变驱动次临界堆^[7-8]、聚变动力堆、聚变制氢堆的设计研发^[9];而且从 2003 年以来为顺应 ITER 国际合作计划以及相关包层

的发展需求,进行了 ITER 实验包层模块^[10-11]的设计研究。在该一系列包层设计中 CLAM 钢是首选结构材料。

本文对 CLAM 钢目前已经开展和正在进行的主要研究工作及进展情况进行了总结,主要包括以下几个部分内容:CLAM 钢的成分设计,纯净化冶炼加工制备工艺研究,辐照前各种性能测试与微观结构分析,辐照性能测试研究,焊接工艺研究,与液态金属 LiPb 相容性研究,涂层制备,材料信息管理数据库等。

1 成分优化设计

在充分了解和掌握目前聚变堆设计研究中对结构材料的要求和目前国际 RAFM 钢发展趋势及研究成果的基础上,提出了自己优化的成分设计^[5]。

由于低活化的要求,CLAM 钢和其他低活化钢一样,采用 W、Ta 和 V 等合金元素来取代常规铁素体/马氏体中的 Mo、Nb 和 Ni 等。此外,与国际上其他 RAFM 钢相比,CLAM 钢有如下特点:

1) W 的成分(质量分数)设计为 1.5%,高于 EUROFER97 的 1.0%,低于 F82H 的 2.0%,目的是保持所需的足够强度,同时又减少焊接热影响区 Laves 相析出的可能性^[12-13]。

2) Cr 的成分(质量分数)设计为 9.0%。Cr 的含量是影响 RAFM 钢韧—脆转变温度(DBTT)变化的原因之一,而 9.0%Cr 在辐照前后具有最低的 DBTT 值^[14]。

3) 更高含量 Ta (0.15%)的添加,是为了

形成大量弥散碳化物,控制晶粒生长,细化晶粒,提高材料强度和韧性。

4) 添加 Mn 来代替 Ni,是为了改善与氦增殖剂液态金属 LiPb 的相容性。

5) 经过活化计算与分析^[15-18],对杂质元素提出了更全面和严格的要求,特别是对 Mo、Nb 等元素,要求尽可能控制其含量(约 10^{-6} 级)。

根据研究进展及不同应用条件要求,CLAM 钢的成分优化仍在不断的进行之中。

2 纯净化冶炼制备工艺研究

从 2001 年开始,通过跟国内许多单位的合作,已经对 CLAM 钢进行了数批次共十几炉次的真空感应熔炼,以探索通过纯净化冶炼工艺,达到准确控制合金元素以及杂质元素的成分和含量,获得适当的微观组织结构以满足性能要求的目的。其(样品)所有化学成分测试结果基本上与设计成分一致,其(材料)性能测试结果也能很好地满足设计要求。

为探索熔炼工艺,早期开展了 5 kg 级的铸锭的熔炼与制备,从 2004 年开始陆续开展了几十 kg 级到几百 kg 级铸锭的制备。通过轧制制备的 CLAM 钢型材包括厚度为 15、12、8、3 mm 的板材、直径 43 mm 的棒材、外径 50 mm 的管材等。

另外,CLAM 钢基本热处理制度定为 980 °C/30 min,空冷或水冷;然后 760 °C/90 min,空冷。并可根据所处理样品厚度等尺寸适当调整保温温度及保温时间。

3 结构分析与性能测试

3.1 结构分析

通过光学显微镜,扫描电镜(SEM)、X 射线能谱(EDS)和透射电镜等对微观结构和组织进行了大量的观察与分析。其中 CLAM 钢正常热处理状态下的金相组织如图 1,未发现可能引发辐照脆性的 δ 铁相。

正常热处理状态下 CLAM 钢微观组织透射电镜(TEM)照片分析显示 CLAM 钢都是由板条状马氏体相组成,且其板条马氏体结构尺寸明显小于日本研究的 JLF-1 (JOYO-2-HEAT)(以下简称为 JLF-1)^[19]。

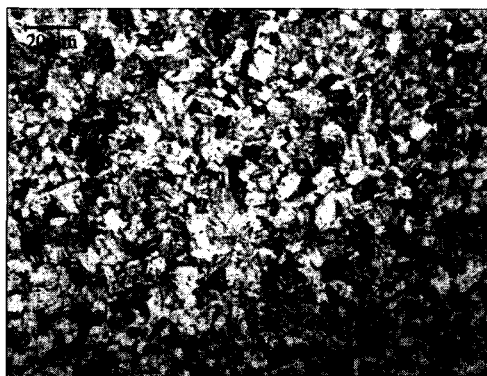


图 1 正常热处理状态下 CLAM 钢金相组织

Fig. 1 Metallurgical structure of CLAM by optical microscopy

3.2 物理性能

对 20 kg 级铸锭 CLAM (FDS HEAT 0408B,简称 HEAT 0408B)进行了较全面物理性能测试,包括密度、比热、热导率、热膨胀系数、弹性模量、电阻率以及磁性能等,并与 JLF-1 进行了对比实验。结果表明,CLAM 钢的物理性能与 JLF-1 钢相似^[19]。其中,结构材料热导率、热膨胀系数以及磁性能等是聚变堆设计研究中的关键参数。有关热导率和热膨胀系数的结果如图 2、图 3 所示,其中热导率与 F82H 有一定差别的原因可能是晶粒尺寸的差异,F82H 的 ASTM 晶粒度数为 3^[20],即为 125 μm ,而 CLAM 钢的晶粒尺寸为 8 μm ^[21]。

磁性能测试采用振动样品磁强计在真空条

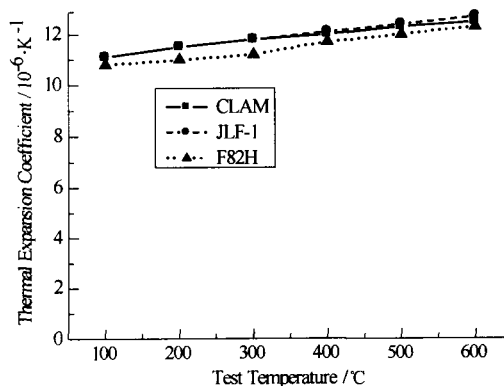


图 2 CLAM、JLF-1 和 F82H 钢热膨胀系数随温度变化曲线

Fig. 2 Thermal expansion coefficient of CLAM, JLF-1 and F82H vs. temperature

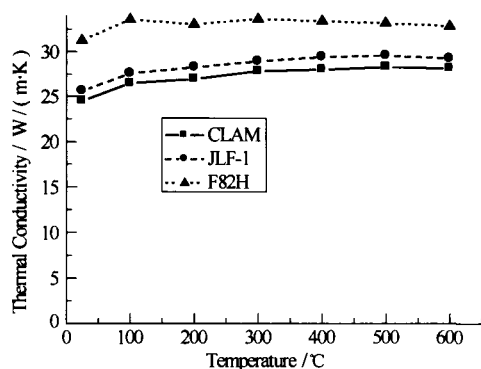


图3 CLAM、JLF-1和F82H
钢热导率随温度变化曲线

Fig. 3 Thermal conductivity for CLAM,
JLF-1 and F82H vs. temperature

件下进行,实验样品尺寸为6 mm×6 mm×6 mm,结果列于表1,磁感应强度与磁导率与JLF-1非常接近。

表1 磁特性测试结果

Table 1 Results of magnetic properties test

温度/°C	饱和磁感应强度/G		磁导率 μ	
	CLAM	JLF-1	CLAM	JLF-1
25	15 800	15 720	4.160	4.144
100	15 740	15 720	4.148	4.144
200	15 510	15 460	4.102	4.092
300	15 140	14 990	4.028	3.998
400	14 580	14 590	3.916	3.918
500	13 670	13 710	3.734	3.742
600	12 140	12 160	3.428	3.432

3.3 力学性能

结构材料的重要机械性能指标主要包括拉伸性能、冲击性能、断裂韧性、抗蠕变性和疲劳性能等。已进行拉伸性能、冲击性能和初步蠕变性能的测试,断裂韧性和疲劳性能测试正在进行中。

3.3.1 拉伸性能

分别对不同批次的棒材和板材进行了拉伸性能测试。2002年和2003年对5 kg级的CLAM钢部分标准试样拉伸测试结果可见文献[22]报道。

2004年对20 kg级进行的CLAM(HEAT 0408A)棒材的拉伸测试结果如表2所示,室温和600 °C强度均不低于文献[13]中所报道的EUROFER97的测试结果。

表2 CLAM(HEAT 0408A)拉伸力学性能

Table 2 Tensile properties of CLAM(HEAT 200408A)

温度	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	最大延伸率/ %	断面收缩率/ %
室温	668	514	25	77
600 °C	334	293	29	87

同时,由于当前辐照设施和容量的有限,小型尺寸试样的测试研究显得尤为重要。因此,国际上对小型尺寸试样测试进行了研究,并对其与标准尺寸试样结果之间的对应关系进行了深入研究和探索^[23-24]。

为了更好地分析CLAM钢辐照后的性能,有必要在辐照前用小尺寸试样对材料性能进行测试研究。2005年在中日重点大学群合作计划(CUP计划)支持下,在日本国立聚变研究所(NIFS)对CLAM(HEAT 0408B)钢进行了小尺寸试样的系列实验,并同时与日本JLF-1钢进行了对比。其拉伸结果如图4所示,结果表明,CLAM钢拉伸性能优于相同条件下测试的JLF-1性能。其详细结果可见文献[19]。

2006年对300 kg级CLAM钢进行了标准拉伸性能测试,如表3所示。结果表明,其拉伸强度与较小炉次材料性能相比得到了进一步提高。

表3 CLAM(HEAT 0603A)拉伸性能

Table 3 Tensile properties of CLAM (HEAT 0603A)

温度/°C	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa
RT	700	561
300	575	493
500	479	413
600	365	279

3.3.2 冲击韧性

由于对大多数体心立方结构材料来说,都有低温脆化现象,而且中子辐照后脆化更严重,

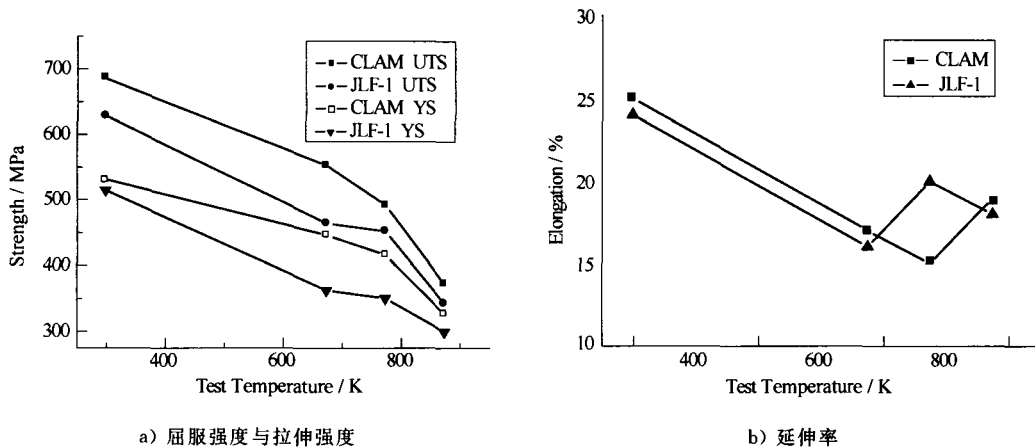


图 4 CLAM(HEAT 200408B)和 JLF-1 钢拉伸性能
Fig. 4 Tensile properties of CLAM and JLF-1 vs. temperature

这将影响材料的正常使用,因此材料的韧-脆转变温度(DBTT)值的大小对聚变堆结构材料来说是一个非常重要的参数。

一般采用 Charpy V 型试样的冲击试验来进行 DBTT 测试,通过测试每个温度的冲击吸收能,绘制出能量-温度曲线,然后取上、下平台能之差的一半所对应的温度定义为 DBTT。

对 CLAM 钢(HEAT 0408B)标准 Charpy V 试样和 1/3 Charpy V 试样分别进行了测试。结果如图 5 和图 6 所示。结果表明,CLAM 钢标准样品的 DBTT 值为 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,而 1/3 尺寸试样的 DBTT 为 $-102\text{ }^{\circ}\text{C}$, JLF-1 钢(JOYO-2-HEAT)DBTT 为 $-86\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。CLAM 钢的 DBTT 值低于国际上所报道的多数

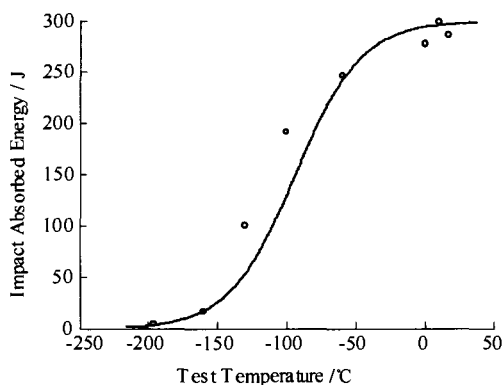


图 5 CLAM 标准尺寸 Charpy V 试样冲击吸收能-温度转变曲线
Fig. 5 Impact absorbed energy of CLAM standard Charpy V samples vs. temperature

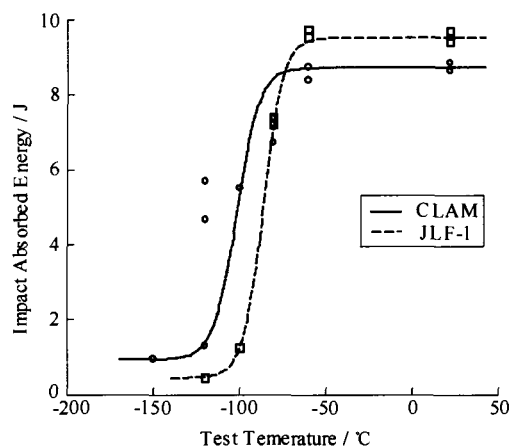


图 6 CLAM 和 JLF-1 1/3 尺寸 Charpy V 试样冲击吸收能-温度转变曲线
Fig. 6 Impact absorbed energy of small samples of CLAM and JLF-1 steels vs. temperature

RAFM 钢测试结果,说明 CLAM 具有较好的低温冲击韧性^[25]。

3.3.3 蠕变性能

材料的高温蠕变性能优劣是决定其发展和使用的重要因素之一。初步进行了 CLAM (HEAT 0311A)在高温 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、载荷 250 MPa 情况下的蠕变实验,同时与 EUROFER97 进行了对比实验。测试结果见图 7 所示^[19]。

由图可知,该铸锭 CLAM 钢的在 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的蠕变速率较 EUROFER97 小,但蠕变断裂时间比 EUROFER97 短。说明该铸锭 CLAM 钢蠕变强度比 EUROFER97 钢高,但延伸率

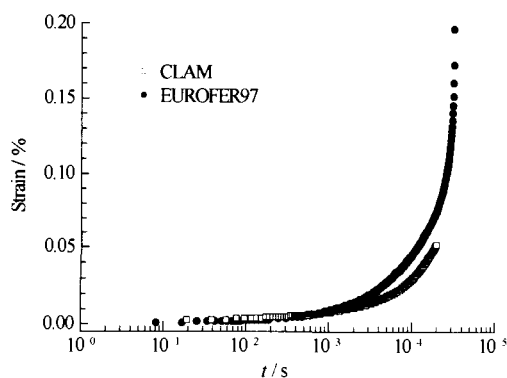


图7 高温 550 °C、载荷 250 MPa 情况下
应变速率—蠕变时间曲线

Fig. 7 Strain-time curves under temperature of 550 °C
and stress of 250 MPa for EUROFER97 and CLAM

较低。其原因和改进方法需进一步探讨研究,其他铸锭的 CLAM 钢的蠕变性能测试正在进行之中。

3.3.4 疲劳性能及断裂韧性

材料内部由于加工或使用的原因不可避免存在一定的微裂纹,材料在服役条件下还可能会承受交变疲劳载荷,也会造成裂纹的萌生和扩展。因此材料的疲劳性能和断裂韧性的研究对聚变反应堆设计与安全运行非常重要。CLAM 钢疲劳性能及不同热处理条件下的裂纹扩展性能以及断裂韧性测试正在进行中,预计在近期内可获得结果。

3.4 辐照性能

聚变堆结构材料的辐照性能是决定其能否最终获得应用的关键性能指标之一。目前缺乏与聚变中子能谱相似的中子源,一般采用超高压电镜、加速器高能离子、快中子堆、高通量中子堆或者散裂中子源等方法来模拟进行聚变堆

材料辐照研究。

3.4.1 电子辐照

图 8 是 CLAM 钢(HEAT 0409C)在电子辐照时的微观结构变化。辐照实验是在日本北海道大学超高压透射电镜(JEM-ARM 1300)中进行的。其加速电压为 1 250 kV,辐照温度为 450 °C,束流强度为 1.2 nA,辐照损伤速率为 2×10^{-3} dpa/s。

从图中可以看出,经过 1.2 dpa 电子辐照后,开始观察到空洞的存在,刚开始形成的空洞的尺寸很小,并且数量有限;随着辐照时间加长,空洞的数密度和直径都在增加,当辐照时间达 10 dpa 时,最初形成的空洞直径已经变得比较大了,如图(d)中的 A、B、C 处的空洞直径分别为 22 nm、11 nm、11 nm;继续辐照发现在这三处的空洞没有明显的长大,而空洞数密度继续增加。

空洞的产生导致 CLAM 钢发生肿胀,经过 1.2 dpa 辐照后的肿胀率非常小,只有约 0.008%,当经过 3.6 dpa 辐照后,肿胀率随辐照时间的增加接近线性关系,经过 14 dpa 辐照后,肿胀率约为 0.26%。

从上述结果可知,与其他 RAFM 钢类似,CLAM 钢具有很低的辐照肿胀率。

3.4.2 离子辐照

2006 年初,利用中国原子能科学研究院 HI-13 串列加速器产生的重离子,进行了 CLAM (HEAT 0408C)钢的辐照效应的模拟研究,并与国外 F82H 和 T91 进行了对比实验研究^[26]。

辐照粒子为 80 MeV 的 F 离子,辐照剂量为 10 dpa。通过测试辐照前后的正电子湮没寿命及其相对强度对其辐照性能进行了分析与评估。正电子湮没测量结果如图 9 所示。

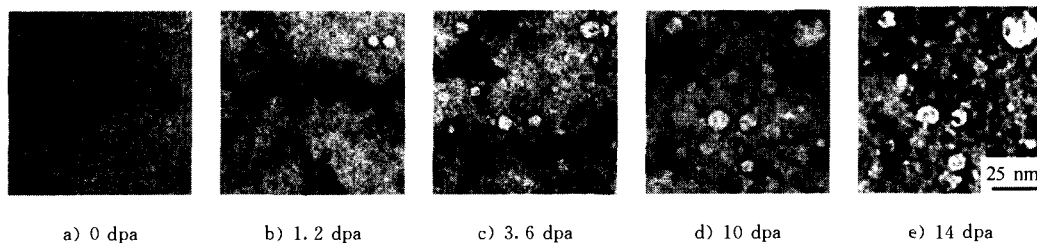


图 8 450 °C 下 CLAM 辐照时的缺陷组织

Fig. 8 Microstructure of CLAM after irradiated at 450 °C

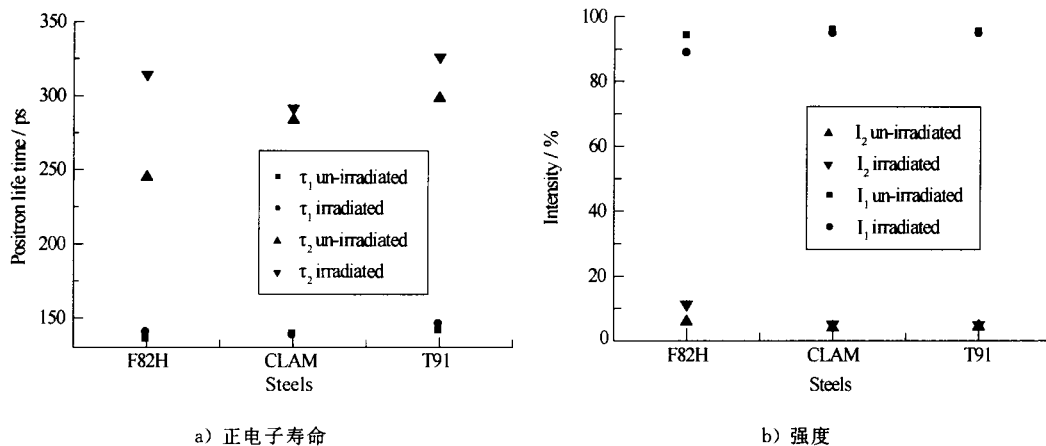


图9 CLAM 辐照前后正电子湮没寿命及其强度变化

Fig. 9 The positron annihilation lifetimes and their intensities in CLAM, F82H and T91 before and after irradiation

图中 τ_1 是自由正电子和被单空位、双空位、位错缺陷捕获的正电子湮没寿命的权重平均值, τ_2 是空位团或空洞捕获的正电子湮没寿命。 τ_2 越大空位团或空洞的尺度越大, τ_1 大表明单空位、双空位、位错缺陷多。由图可见, CLAM 的抗辐照性能优于 F82H 和 T91。 CLAM 的辐照效应随剂量 (0~100 dpa) 和温度的变化研究正在进行或考虑中。

3.4.3 中子辐照

因为 CLAM 钢作为包层结构材料在服役过程中将受到高流强 14 MeV 中子辐照, 因此 CLAM 钢在不同温度下中子辐照后性能演化研究非常重要, 它关系到聚变堆包层的安全运行。正在与国内、美国、瑞士以及日本等国家著名核研究机构进行合作研究, 即将和正在其各自的反应堆、高通量同位素反应堆 HFIR、散裂中子源 SINQ、聚变中子源 FNS 等装置上进行中子辐照实验。

3.4.4 等离子体辐照

RAFM 钢作为包层结构材料如果能够直接面向等离子体, 将大大降低包层的制造难度及成本, 国际上对此进行了相关研究^[27-28]。我们于 2003 年、2005 年分别在 HT-7 托卡马克中针对 CLAM 钢不同大小样品进行了初步的实验探索, 并与 EUROFER97 进行了对比实验。结果显示: 样品表面绝大多数部分维持了

实验前形貌。同时也观察到在 CLAM 钢与 EUROFER97 样品表面局部出现了浮泡、熔化现象^[29], 大样品实验发现离子漂移侧浮泡比较多, 而电子漂移侧钢的表面熔化现象比较明显^[30], 这主要是因为等离子体破灭瞬间在样品表面出现了较大等离子体能量的沉积所致。另外不同大小样品的引入并没有影响等离子体的正常放电和参数。进一步的实验研究正在计划之中, 以确定直接采用 RAFM 钢作为面向等离子体材料的可行性。

3.5 与液态金属 LiPb 相容性

RAFM 钢与液态金属锂铅的相容性一直是聚变堆液态金属锂铅包层研究领域的热点问题之一^[31-32]。FDS 团队于 2005 年成功建造了中国第一座液态金属锂铅实验回路 DRAGON-1, 并首次在 480 °C 下对 CLAM 钢样品及 316L 不锈钢样品进行了 500 h 的对比腐蚀实验。腐蚀后 CLAM 钢样品与 316L 样品横截面的 SEM (背散射) 如图 10, 可以看出 CLAM 钢样品表面观察不到明显的腐蚀现象, 而 316L 不锈钢基体组织则发生了不均匀的溶解腐蚀, 腐蚀现象比较明显, 说明 CLAM 钢与液态锂铅具有较好的相容性^[33]。在此基础上的更高温度、更长时间以及更高流速条件下的腐蚀实验正在进行之中, 以获取更全面可靠的腐蚀数据, 从而对 CLAM 成分与性能的进一步优化以及包层设

计提供依据。

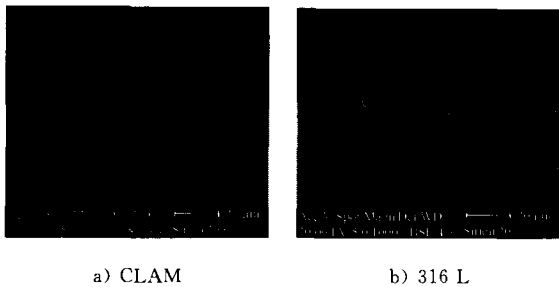


图 10 480 °C/500 小时腐蚀后
样品横截面 SEM 照片(清洗后)

Fig.10 SEM micrograph of sample's
cross section after corrosion (cleaned)

4 CLAM 钢的焊接工艺

焊接技术和工艺关系到包层及 TBM 能否

最终成功制造,是 CLAM 钢走向实际应用的关键技术之一。

热等静压扩散焊接技术具有可实现复杂形状的面与面焊接、没有热影响区、可实现复杂形状部件焊接等独特的优点,目前被普遍认为是将来第一壁及包层冷却板和强化板的制造技术^[34],许多国家都对其 RAFM 钢的热等静压焊接技术进行了比较全面的研究^[35-37]。

目前已经开展 CLAM 钢热等静压焊接技术的初步实验研究,进行了三次热等静压焊接实验,实验中采用包套封装,除气后封焊的方式进行焊前处理,实验发现 CLAM 钢热等静压焊接性能对前期处理工艺非常敏感,初步实验中其拉伸性能达到了母材的水平(见表 4),但冲击性能需要进一步提高^[38],进一步的实验研究正在进行中。

表 4 不同条件下的 HIP 焊接样品拉伸实验结果

Table 4 Tensile properties of HIP joints

实验条件	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	延伸率/%	断面收缩率/%	备注
—	640	492	28	78.1	母材
1 050 °C/3 h	550	495	—	—	脆断
1 100 °C/4 h	635	475	24.5	74.0	延性断口
1 150 °C/4 h	650	495	25.0	74.0	延性断口

另外,CLAM 钢的其他焊接工艺如单轴加压扩散焊接、电子束焊接、氩弧焊以及焊接的热模拟分析等焊接技术及包层小模块制造正在计划之中。

5 涂层制备技术

在聚变堆液态包层设计中,涂层技术是一项非常重要的关键技术,如 Al_2O_3 、SiC 等涂层。涂层的主要作用包括:(1) 作为氙的渗透壁垒以减少氙的渗漏;(2) 作为电绝缘涂层用来减小液态金属磁流体动力学(MHD)效应;(3) 作为腐蚀阻挡层可以允许包层结构材料在较高的运行温度下使用。

由于 Al_2O_3 涂层具有众多的优点而被广泛研究和选作 LiPb 包层的首选涂层材料。目前已经采用化学气相沉积(CVD)法进行过 Al_2O_3

涂层的初步制备工艺研究,具体方法是采用 FeAl 粉包埋法 740 °C 下表面渗铝,然后在氧化气氛中形成 Al_2O_3 绝缘层。涂层截面 SEM 照片如图 11,涂层横截面的 SEM 及 EDS 分析表明,整个涂层厚约 22 μm ,外层为大约 6 μm 厚的 AlFe 相,而内层为典型的 α -Fe(Al) 相^[39]。另外对涂层电绝缘性等进行了测试分析。进一步的涂层电绝缘性等进行了测试分析。进一步的涂层电绝缘性等进行了测试分析。进一步的涂层电绝缘性等进行了测试分析。

6 CLAM 钢信息管理数据库

CLAM 钢的设计和冶炼,热处理和加工以及实验测试等过程中会产生大量的设计参数、实验结果,为了方便对这些数据和资料进行收集、归类、分析及管理,同时为了方便相关人员的查询和使用等,建立了聚变材料数据库平台

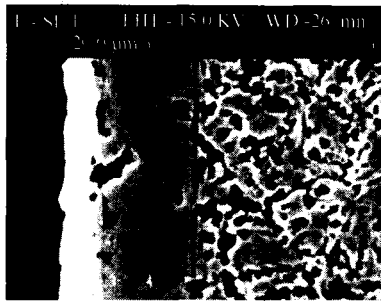


图 11 740 °C 下 CVD 方法制备的
Al₂O₃ 涂层 SEM 截面照片

Fig. 11 SEM micrograph of alumina coatings
formed on CLAM steel surface at 1 013 K

FUMDS (FUSion Materials Database System)。目前国际上也正在开展和进行类似核材料数据库的研发^[40-42]。FUMDS 用户界面如图 12。该数据库主要包括以下功能:(1) 对聚变材料相关数据进行系统管理和分析,并且可实时更新;(2) 通过网络方式提供大量和系统的核材料实验数据及主要成果以供查询和检索;(3) 采用现代数据分析方法,提炼出有价值的信息,为工程设计等提供帮助。

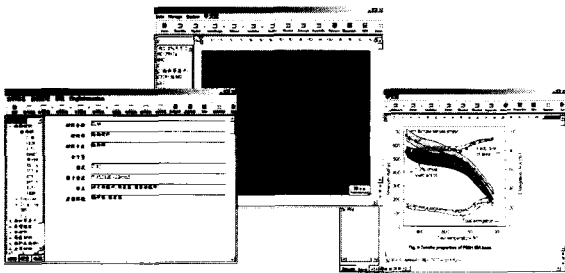


图 12 FUMDS 材料浏览及数据查询

Fig. 12 Interface for browsing and searching
of materials data in FUMDS

7 结束语

中科院等离子体物理研究所 FDS 团队在国家自然科学基金、中科院知识创新工程项目、国家 973 项目等的支持下,组织开展了具有中国自主知识产权的中国低活化马氏体钢——CLAM 钢的研制。几年来在与国内外多家单位的合作和共同努力下,CLAM 钢的研发已经

取得了较大的进展。其中 CLAM 钢的熔炼制备规模已经达到吨级,为下一步大规模工业化生产打下了坚实的基础。而且其辐照前机械性能与国际上几种典型的 RAFM 钢的性能类似或者更优,其初步离子辐照性能也优于进行对比实验的其他 RAFM 钢性能。

当然,为了最终成功应用于 ITER 实验包层模块以及聚变堆包层制造,CLAM 钢的研发仍然需要多方面进一步的深入研究,主要包括:(1) CLAM 钢成分、性能的进一步优化;(2) 更大规模的冶炼制备;(3) CLAM 钢辐照前性能的全面测试和评估;(4) 辐照性能的全面测试和研究,尤其是高剂量中子辐照实验及性能分析;(5) 各种焊接工艺及焊接性能的研究;(6) 托卡马克实验装置内的在线实验;(7) 实验包层模块的加工制造与回路实验等。

参考文献:

- [1] Klueh R L, Gelles D S, et al. Ferritic/Martensitic Steels-Overview of Recent Results [J]. J. Nucl. Mater., 2002, 307-31: 455-465.
- [2] Kohno Y, Kohyama A. Mechanical Property Changes of Low Activation Ferritic/Martensitic Steels after Neutron Irradiation [J]. J. Nucl. Mater., 1999, 271-272: 145-150.
- [3] Klueh R L, Alexander D J, et al. The Effect of Tantalum on the Mechanical Properties of a 9Cr-2W-0.25V-0.07Ta-0.1C Steel [J]. J. Nucl. Mater., 1999, 273: 146-154.
- [4] Huang Q, Wu Y, Li C, et al. R&D Activities of Fusion Material and Technology for Liquid LiPb Blankets at ASIPP [C]. proceedings of 8th China-Japan Symposium on Materials for Advanced Energy Systems and Fission & Fusion Engineering, Sendai, Japan, Oct. 4-8, 2004; 237-243.
- [5] 黄群英, 郁金南, 万发荣, 等. 中国低活化马氏体钢的发展[J]. 核科学与工程, 2004, 24(1): 56-64.
- [6] Huang Q, Li C, Li Y, et al. Progress in Development of China Low Activation Martensitic Steel for Fusion Application [C]. presented at the 12th Inter. Conf. On Fusion Reactor Materials, Santa Barbara, USA, Dec. 4-9, 2005.
- [7] Wu Y, Qian J, Yu J. The fusion-driven hybrid system and its material selection [J]. J. Nucl. Mater., 2002, 307-311: 1629-1636.
- [8] 吴宜灿, 柯严, 郑善良, 等. 聚变驱动次临界堆概念设计

- 研究[J]. 核科学与工程, 2004, 24(1):72-80.
- [9] 吴宜灿, 汪卫华, 刘松林, 等. 聚变发电反应堆概念设计研究[J]. 核科学与工程, 2005, 25(1):76-85.
- [10] Wu Y, Liu S, et al. Design Concept and Testing Strategy of a Dual Functional Lithium Lead Test Blanket Module for ITER and EAST [C]. presented at the 21st IAEA Fusion Energy Conference, Chengdu, China, 16-21 October, 2006.
- [11] Wu Y, Huang Q, et al. Design Status and Development Strategy of China Liquid Lithium-Lead Blankets and Related Material Technology [C]. presented in the 12th International Conference on Fusion Reactor Materials, Santa Barbara, California, USA, Dec. 4-9, 2005.
- [12] Kimura A, Kayano H, Misawa T. Designation of alloy composition of reduced-activation martensitic steel [J]. J. Nucl. Mater., 1994, 212-215;690-694.
- [13] Rieth M, Schirra M, Falkenstein A, et al. Eurofer97 Tensile, Charpy, Creep and Structural Test [R]. FZKA 6911, 2003.
- [14] Kohyama A, Hishinuma A, Gelles D S, et al. Low-Activation Ferritic and Martensitic Steels for Fusion Application [J]. J. Nucl. Mater., 1996, 233-237;138-147.
- [15] Huang Q, Li J, Chen Y. Study of Irradiation Effects in China Low Activation Martensitic steel CLAM [J]. J. Nucl. Mater., 2004, 329-333;268-272.
- [16] Huang Q, Zheng S, Chen Y, et al. Activation Characteristics of Fuel Breeding Blanket Module in Fusion Driven Subcritical System [J]. J. Nucl. Mater., 2002, 307-311;2384-2387.
- [17] 陈明亮, 黄群英, 等. 聚变发电反应堆双冷液态锂铅包层活化分析和废料处理[J]. 核科学与工程, 2005, 25(2): 178-183.
- [18] 黄群英, 陈明亮, 彭蕾, 等. 聚变驱动次临界堆双冷嬗变包层材料活化计算与分析[J]. 核科学与工程, 2004, 24(3):269-276.
- [19] 黄群英. 聚变堆结构材料——中国低活化马氏体钢设计与性能研究[D], 安徽合肥, 中国科学院等离子体物理研究所, 2006.
- [20] Hirose T, Shiba K, Sawai T, et al. Effects of heat treatment process for blanket fabrication on mechanical properties of F82H [J]. J. Nucl. Mater., 2004, 329-333;324-327.
- [21] 李艳芬, 黄群英, 吴宜灿. CLAM 钢冲击和拉伸性能测试与研究[J]. 原子核物理评论, 2006, 23(2):151-154.
- [22] Zhao F, Wan K, Wan F, et al. The structure and properties of Low Activation Ferritic/Martensitic Steels [C], Material Science Forum, 2005, 475-479; 1383-1386.
- [23] Misawa T, Adachi T, Saito M, et al. Small punch tests for evaluating ductile-brittle transition behavior of irradiated ferritic steels [J]. J. Nucl. Mater., 1987, 150; 194-202.
- [24] Kurishita H, Kayano H, Narui M, et al. Current status of small specimen technology in Charpy impact testing [J]. J. Nucl. Mater., 1994, 212-215;1682-1687.
- [25] Li Y, Huang Q, et al. Mechanical Properties and Microstructures of China Low Activation Martensitic Steel Compared with JLF-1 JOYO-2-HEAT [C]. The 12th International Conference on fusion reactor materials (ICFRM-12), Santa Barbara, California, USA, Dec. 4-9, 2005.
- [26] Li Y, Huang Q, Wu Y, et al. Effects of Addition of Yttrium on Properties and Microstructure for China Low Activation Martensitic Steel (CLAM) [C]. The 24th Symposium on Fusion Technology Programme Summary, Warsaw, Sept. 11-15, 2006.
- [27] Tsuzuki K, Shinohara K, Kamiya K, et al. Investigation of Compatibility of Low Activation Ferritic Steel with High Performance Plasma by Full Covering of Inside Vacuum Vessel Wall on JFT-2M [J]. J. Nucl. Mater., 2004, 329-333;721-725.
- [28] Tsuzuki K, Sato M, et al. Recent Activities on the Compatibility of the Ferritic Steel Wall with the Plasma in the JFT-2M Tokamak [J]. J. Nucl. Mater., 2002, 307-311;1386-1390.
- [29] 李强, 黄群英, 郁金南, 等. CLAM 钢、Eurofer97 钢与钨在 HT-7 托卡马克中辐照后的表面分析[J]. 核科学与工程, 2004, 24(1):157-163.
- [30] Li C, Huang Q, Feng Y, et al. Interaction of CLAM Steel with Plasma in HT-7 Tokamak during High Parameter Operation [J]. Plasma Science and Technology, to be published.
- [31] Glasbrenner H, Konys J, et al. Corrosion of ferritic-martensitic steels in the eutectic Pb-17Li [J]. J. Nucl. Mater., 2000, 283-287; 1332-1335.
- [32] Konys J, Krauss W, et al. Corrosion behavior of EUROFER steel in flowing eutectic Pb-17Li alloy [J]. J. Nucl. Mater., 2004, 329-333; 1379-1383.
- [33] Huang Q, et al. Corrosion Experiment in the First Liquid Metal LiPb Loop of China [C]. The 24th Symposium on Fusion Technology Programme Summary, Warsaw, Sept. 11-15, 2006.
- [34] Cardella A, Rigal E, Bedel L, et al. The Manufacturing Technologies of the European Breeding Blankets [J]. J. Nucl. Mater., 2004, 329-333;133-140.
- [35] Norajitra P, Reimann G, Ruprecht R, et al. HIP Experiments on the First Wall and Cooling Plate Specimens for the EU HCPB Blanket [J]. J. Nucl. Mater., 2002, 307-311;1558-1562.

(下转第 85 页, continued on page 85)

装时未考虑电场的均匀性问题,致使探测效率较低,在灵敏区内放射源的不同位置对电离电流的收集影响也较大。

5 结束语

通过上面的实验证明,离子收集式 α 探测器不仅对 α 粒子有较好的响应,而且对 β ,尤其是低能 β 亦有较好的响应。由此而发展出的各种类型的表面污染探测器,在辐射防护领域提供了广阔的应用前景。但这种探测器所测量的是电离电流的平均值,它不能区分粒子的类型和能量,也不能直接给出粒子的表面发射率,另外,它受环境因素(气压、温湿度、灰尘等)的影响较大。它监测的先决条件必须是事先明确监测对象的粒子类型(如 α 或 β),必须是单一核素,必须由该素的标准放射源刻度之后才能给出有意义的结果。下一步工作应重点研究环境因素对测量的影响,为实际应用积累更多的数据。

参考文献:

- [1] MacArthur D W, Allander K S. Long range Alpha Detector[M]. Albuquerque : Los Alamos National Laboratory Report,1991;LA-12073-MS. 155.
- [2] MacArthur D W, Allander K S, Bounds J A. Small Long range Alpha Detector (LRiD) with Computer Readout [M]. Albuquerque : Los Alamos National Laboratory Report. 1991;LA-12199-MS,200.
- [3] MacArthur D W, Allander K S, McAttee J L. Long range Alpha Detector for Contamination Monitoring[M]. Albuquerque : Los Alamos National Laboratory Preprint, 1991;LA-UR-91-3396,170.
- [4] MacArthur D W, McAttee J L. Long range Alpha Detector(LRAD)[M]. Albuquerque : Los Alamos National Laboratory Preprint, 1991;LA-UR-3398,241.
- [5] 韩景泉. 离子收集式 α 探测器[J]. 原子能科学技术, 1998,32;503-509.
- [6] MacArthur D W, Allander K S, Bounds J A, et al. Long range Alpha Detector[J]. Health Phys. 1992,63;324.
- [7] Sharpe J. Nuclear Radiation Detectors. London: Methuen and CO. LTD, 1955.
- [8] Watt D E, Ramsden D. High Sensitivity counting Techniques[R]. Pergamon press. London, 1964.
- [9] MacArthur D W, Allander K S, Bounds J A, et al. Alpha Contamination Monitoring of Surface, Objects, and Enclosed Areas[J]. IEEE. Transaction on Nuclear Science. 1993, 40;840.
- [10] Johnson J D, Allander K S, Bounds J A, et al. Long range Alpha Detector Sample Monitoring[J]. Nucl. Instrum Methods, 1994, A. 353.
- [11] Johnson J D, Allander K S, Bounds J A, et al. Recent Advance of Electrostatic Long range Alpha Detector. Albuquerque : Los Alamos National Laboratory preprint, 1990;LA-UR-94,1586.
- [36] Oda M, Kurasawa T, Kuroda T, et al. Development of HIP Bonding Procedure and Mechanical Properties of HIP Bonded Joints for Reduced Activation Ferritic Steel F82H [R], JAERI-Tech 97-013, 1997.
- [37] Rigal E, Briottet L, Dellis Ch, et al. HIP Diffusion Bonding and Forming of Martensitic Steel for ITER Test Blanket Modules [C]. proceeding of the 21st Symposium on Fusion Technology, 2000, p. 1223-1226.
- [38] 李春京, 黄群英, 吴宜灿, 等. 中国低活化马氏体钢 (CLAM)热等静压扩散焊接初步研究 [J]. 核科学与工程, 2007, 1.
- [39] Lix, Yu G, Yu J, et al. Al based coating on martensitic steel [J]. J. Nucl. Mater. , 2004, 329-333;1407-1410.
- [40] Jitsukawa S, Tamura M, et al. Development of an extensive database of mechanical and physical properties for reduced-activation Martensitic steel F82H [J]. J Nucl. Mater. , 2002,307-311;179-186.
- [41] Sharafat S, Ghoniem N, Odette R, et al. A Damage-Mechanics Based Approach to Structural Design of ITER Components [C]. presented at US-ITER TBM Meeting, UCLA, Nov. 3-5, 2003.
- [42] Karditsas P J, Lloyd G, Walters M, et al. The European Fusion Material properties database [J]. Fusion Eng. & Des. , 2006, 81;1225-1229.

(上接第 50 页, continued from page 50)