

文章编号: 1007-4627(2006)02-0151-04

## CLAM 钢冲击和拉伸性能测试与研究\*

李艳芬, 黄群英, 吴宜灿

(中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 对中国低活化马氏体钢——CLAM 钢的冲击和拉伸性能进行了测试。结果表明: CLAM 钢的塑-脆转变温度在  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右, 低于国际上其它几种典型的低活化马氏体钢; 在室温和  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  时抗拉强度分别为 668 和 334 MPa, 类似于 EUROFER97 的性能。约  $8\text{ }\mu\text{m}$  的晶粒尺寸是 CLAM 钢具有较好冲击和拉伸性能的主要原因之一。

**关键词:** CLAM 钢; 塑-脆转变温度; 拉伸性能; 断口形貌; 晶粒尺寸

**中图分类号:** TL341 **文献标识码:** A

### 1 引言

低活化铁素体/马氏体钢 (RAFM 钢) 由于低的热膨胀系数、高的热导率、优良的抗肿胀和抗辐照脆性等优越性能, 而被选作未来 DEMO 聚变示范堆和第一座聚变动力堆的首选候选结构材料。在 20 世纪 80 年代国际上就开始了 RAFM 钢的广泛研究, 并取得了很大进展<sup>[1-3]</sup>, 如 EUROFER97, F82H, JLF-1 和 9Cr-2WVTa 等的发展。近几年, 关于中国低活化马氏体钢 (CLAM) 的研究和开发工作也在中科院等离子体物理研究所 FDS 材料课题组及与国内外研究所及大学的广泛合作而展开<sup>[4]</sup>。

由于 RAFM 钢具有体心立方结构, 会产生冷脆现象, 即当试验温度或使用温度低于某一温度时, 材料将由原来的韧性状态转为脆性状态, 其冲击能量明显降低, 这个温度称为塑-脆转变温度 (DBTT)。在中子辐照下 DBTT 温度会上升, 可能影响材料正常工作。故 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, 它通常是根据系列冲击实验来测量的。

此外, RAFM 钢存在最高使用温度上限问题<sup>[5]</sup>, 即当超过某一温度范围时, 屈服强度和蠕变强度会急剧下降。温度范围一般为  $550\text{--}600\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[5]</sup>。故有必要对 CLAM 钢高温力学性能进行测试。

这里我们对 CLAM 钢的冲击性能以及在室温和

和  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  时的拉伸性能进行了测试和分析讨论, 并与其它 RAFM 钢性能进行了相应比较。此外, 还用光学显微镜对显微组织进行了观察, 用 SEM 对冲击断口进行了观察分析。

### 2 实验过程和方法

CLAM 钢采用高纯原材料, 经 25 kg 真空感应炉加 Ar 气保护熔炼而成, 最后锻造加工成  $\phi 12\text{ mm}$  的棒材。然后对其进行热处理, 其过程为:  $980\text{ }^{\circ}\text{C}/30\text{ min}$  奥氏体化处理后水淬, 并经  $760\text{ }^{\circ}\text{C}/90\text{ min}$  回火处理。其化学成分见表 1。经过粗、细两道加工工序, 加工成  $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 55\text{ mm}$  的 Charpy V 型缺口标准冲击试样<sup>[6]</sup> 和中间标注段为  $\phi 5\text{ mm}\times 30\text{ mm}$  的标准拉伸试样。

表 1 CLAM(FDS-HEAT 0408A) 钢化学成分  
及杂质重量含量 (%)

元素	Fe	Cr	V	Ta	Mn	C	W	S	
含量	Bal.	8.91	0.20	0.15	0.39	0.12	1.44	0.003	
元素	O	N	P	Cu	Al	Ni	Co	Ti	
含量	0.002	0.008	4	0.003	0.028	0.18	0.043	0.006	0.004

在 Zwick/Roell 型摆锤式冲击实验机上进行系列标准试样冲击实验。采用液氮为冷却剂, 以无水

收稿日期: 2005-11-20; 修改日期: 2006-01-12

\* 基金项目: 中国科学院知识创新工程资助项目; 国家自然科学基金资助项目 (10375067)

作者简介: 李艳芬 (1977-), 女 (汉族), 湖南人, 研究实验员, 从事低活化钢的研究; E-mail: yfli@ipp.ac.cn

乙醇为冷却介质。液氮和无水乙醇的适当调和达到所要求的实验温度。测温使用低温酒精温度计。试样在冷却介质中保温 15 min。每个试验温度用 1 个冲击试样，每次冲击从低温槽中取出试样到冲断用时均不超过 3 s。

室温和高温拉伸实验分别在 SFL-5AG 和 DCS-25T 的拉伸机上进行。断口分析在 SIRION-200 型扫描电子显微镜(SEM)上观察。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 标准 Charpy V 试样冲击结果

从室温到液氮温度共选取了 9 个实验温度。根据不同实验温度下的能量值，绘制出冲击吸收能随实验温度变化的曲线，如图 1 所示。根据 DBTT 能量法定义<sup>[6]</sup>，取上、下平台吸收能之差的一半所对应的温度为 DBTT。从曲线上可以得知：CLAM 钢的 DBTT 值约为  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。而 EUROFER97 约为  $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[7]</sup>，F82H 约为  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[8]</sup>。说明 CLAM 钢具有更良好的冲击韧性。

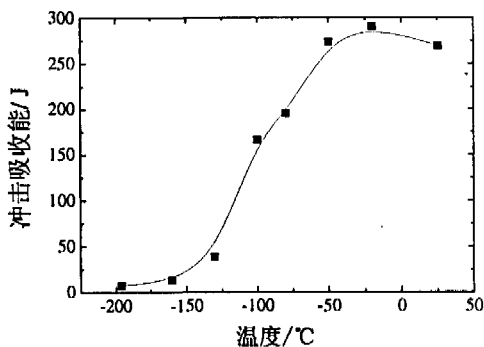


图 1 CLAM 钢(FDS-HEAT 0408A)标准试样冲击吸收能与试验温度关系曲线

#### 3.2 拉伸实验结果

对 CLAM 钢进行了室温和  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  高温拉伸性能测试。其实验结果分别列于表 2 和表 3。

从表 2 可以看出，对于室温拉伸，CLAM 钢抗拉强度和延伸率均高于 EUROFER97<sup>[7]</sup>，屈服强度略低于 EUROFER97。说明 CLAM 钢室温性能与 EUROFER97 接近。

对于  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  高温拉伸，CLAM 钢抗拉强度和屈服强度均高于 EUROFER97，延伸率也不低于 EUROFER97。说明 CLAM 钢具有较好的高温力学性能。

表 2 CLAM 钢(FDS-HEAT 0408A)室温拉伸性能

试样	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	延伸率 (%)	断面收缩率 (%)
CLAM	668	514	25	77
EUROFER97 <sup>[7]</sup>	652	537	20.8	79.9

表 3 CLAM 钢(FDS-HEAT 0408A)  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  拉伸性能

试样	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	延伸率 (%)	断面收缩率 (%)
CLAM	334	293	29	87
EUROFER97 <sup>[7]</sup>	292	277	29.3	94.1

#### 3.3 冲击断口形貌

观察 CLAM 钢各个实验温度下所得到的试样宏观断口，可看到从室温开始，随着实验温度的下降，表面无金属光泽的纤维状断口面积不断减少，而位于中心、齐平的、有金属光泽的结晶状断口面积不断增大。

用 SEM 观察断口中心部位的微观形貌。CLAM 钢试样在 RT， $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  以及  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  的冲击断口形

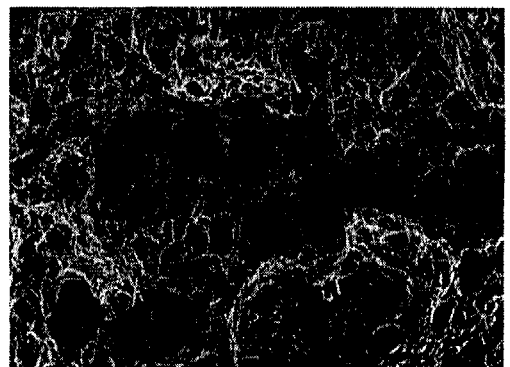


图 2 CLAM 钢 RT 冲击断口形貌

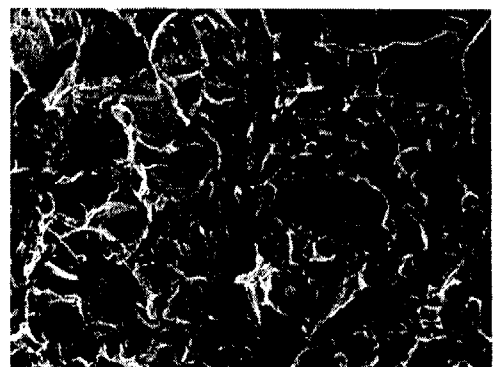


图 3 CLAM 钢  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  冲击断口形貌

貌如图 2—4 所示。

RT 冲击断口(图 2 所示)不平整,以韧窝为主。

-196 ℃ 冲击断口(图 3 所示),可以看到明显的河流花样,为脆性解理断口。

而 -100 ℃ 冲击的断口,在 V 型缺口根部以及靠近中心附近是韧性区,如图 4(a)所示;在试样中心接近底部出现解理形貌,如图(b)所示。其中,韧性区和脆性区面积各约占 50%。

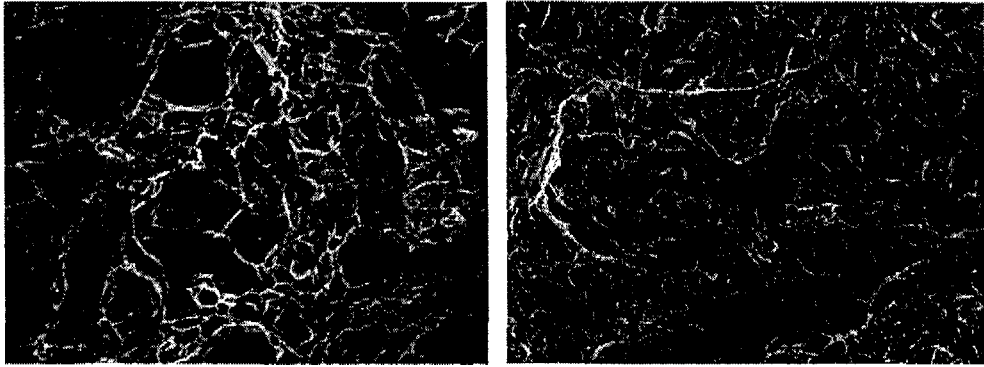


图 4 CLAM 钢 -100 ℃ 冲击断口形貌

## 4 讨论

材料工艺决定其微观,而微观决定了材料最终的宏观性能。CLAM 具有良好的冲击和拉伸性能,可以从微观角度来解释。

根据 Holl-Petch 公式<sup>[9]</sup>,晶粒大小  $d$  与金属材料屈服强度  $\sigma_s$  之间的关系为

$$\sigma_s = \sigma + K_y d^{-1/2}, \quad (1)$$

其中,  $\sigma$  为位错在晶体中运动的摩擦力,  $K_y$  是与材料有关的常数,二者均与晶粒大小无关。故晶粒越细,材料的强度越高。

同样, Petch 方程<sup>[10]</sup>对晶粒尺寸与 DBTT 关系也有描述,即晶粒越细小, DBTT 越低:

$$\beta T_k = \ln B - \ln C - \ln d^{-1/2}, \quad (2)$$

式中,  $\beta$ ,  $B$  和  $C$  均为常数,  $d$  为原奥氏体的晶粒尺寸,  $T_k$  为 DBTT。故细化晶粒是同时提高材料强度和 DBTT 的一个有效途径。

CLAM 钢中含有 0.2% V 和 0.15% Ta。根据文献[11], Ta 和 V, 特别是 Ta, 对晶粒细化起了主要作用。即 Ta 与 C, N 形成富含 Ta 的碳化物、氮化物,在固溶处理时钉扎原奥氏体晶界,阻止晶粒长大,从而起到细化晶粒的作用。

在回火处理后, Ta 以碳化物的形式在马氏体板条内或板条间弥散沉淀析出,这些不可切割的、

球状沉淀相可以阻碍位错的运动,稳定马氏体板条结构,从而对基体起到了一定的强韧化作用<sup>[12]</sup>。如 9Cr-2WVTa 钢中由于添加了少量的 Ta, 具有比 9Cr-2WV 钢更低的 DBTT<sup>[12]</sup>。

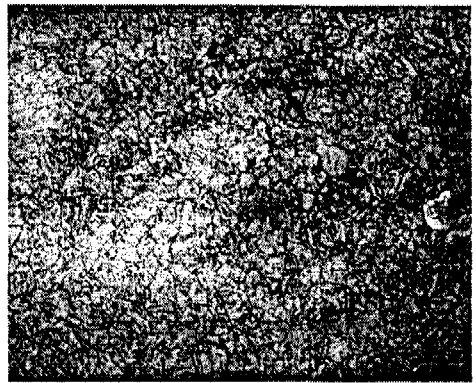


图 5 CLAM 钢显微组织

CLAM 钢的原奥氏体晶粒约 8  $\mu\text{m}$ , 如图 5 所示,而 EUROFER97 的晶粒约为 16.5  $\mu\text{m}$ <sup>[7]</sup>。所以,更细的晶粒对 CLAM 钢 DBTT 的降低起了相当大的作用,使其具有比 EUROFER97 更低的 DBTT,同时具有较高的强度。

此外, W 能提高马氏体钢的高温性能<sup>[13]</sup>。CLAM 钢 W 重量含量为 1.5%, 而 EUROFER97 中为 1.0%, 所以 CLAM 钢高温屈服强度要稍高。

## 5 结论

根据上面的分析,可以初步得出以下结论:

(1) CLAM 钢标准 Charpy V 冲击试样测试给出其 DBTT 约为  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 比类似热处理条件下的 EUROFER97 的 DBTT 值约低  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右, 说明其具有较好的冲击韧性。

(2) CLAM 钢室温拉伸性能与 EUROFER97 钢

近似, 而其高温拉伸性能稍高于 EUROFER97 钢。说明 CLAM 钢具有较好的拉伸性能。

(3) CLAM 钢冲击断口分析表明: 在上平台区, 断口以韧性为主; 在转变温度区, 为韧窝加解理; 在下平台区, 为解理断裂。

(4) 约  $8\text{ }\mu\text{m}$  的晶粒尺寸是 CLAM 钢具有较好力学性能的主要原因之一。

## 参考文献:

- [1] Kohyama A, Hishinuma A, Gelles D S, *et al.* J Nucl Mater, 1996, **233—237**: 138.
- [2] Noda T, Jones R H. J Nucl Mater, 1999, **271 & 272**: 518.
- [3] Muroga T, Gasparotto M, Zinkle S J. Fusion Eng & Des, 2002, **61—62**: 13.
- [4] 黄群英, 郁金南, 万发荣等. 核科学与工程, 2004, **24**(1): 56.
- [5] Kohyama A, Hishinuma A, Gelles D S, *et al.* J Nucl Mater, 1996, **233—237**: 138.
- [6] GB/T 229-1994 金属夏比缺口冲击试验方法, 中华人民共和国国家标准.
- [7] Rieth M, Schirra M, Falkenstein A, *et al.* FZKA 6911, 2003.
- [8] Jitsukawa S, Tamura M, van der Schaaf B. J Nucl Mater, 2002, **307—311**: 179.
- [9] 杨瑞成. 材料科学与工程导论. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002.
- [10] 束得林. 金属的力学性能. 北京: 北京工业出版社, 1987.
- [11] Hasegawa T, Tomita Y, Kohyama A. J Nucl Mater, 1998, **258—263**: 1 153.
- [12] Klueh R L, Alexander D J, Rieth M. J Nucl Mater, 1999, **273**: 146.
- [13] Hong S G, Lee W B, Park C G. Nucl Mater, 2001, **288**: 202.

## Study on Impact and Tensile Properties of CLAM Steel\*

LI Yan-fen, HUANG Qun-ying, WU Yi-can

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** The impact and tensile tests were carried out on the China Low Activation Martensitic steels (CLAM). The results show: the Ductile-Brittle Transition Temperature (DBTT) is about  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , which is lower than those of some other RAFMs; The ultimate strength are 668 MPa at room temperature and 334 MPa at  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , which are comparable to those of EUROFER97. The finer grain size of about  $8\text{ }\mu\text{m}$  was considered as one of reasons for the superior mechanical properties of CLAM.

**Key words:** CLAM steel; DBTT; tensile property; fractography; grain size

\* Foundation item: Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences; National Natural Science Foundation of China(10375067)