DOI: 10.3901/JME.2019.02.195

聚变堆低活化铁素体/马氏体(RAFM)钢 焊接研究进展*

吴世凯^{1,2} 张建超^{1,2} 廖洪彬³ 王晓宇³

(1. 北京市激光应用技术工程技术研究中心 北京 100124;

2. 北京工业大学激光工程研究院 北京 100124;

3. 核工业西南物理研究院 成都 610225)

摘要: 低活化铁素体/马氏体钢(Reduced Activation Ferritic / Martensitic steel, RAFM)被普遍认为是未来聚变示范堆和聚变动力堆第一壁包层的首选结构材料, 由于第一壁服役环境苛刻, 特别是焊缝区, 不可避免会产生辐照缺陷、表面脆化、化学刻蚀、再沉积等各种损伤和缺陷, 严重影响其使用寿命和聚变堆运行安全, 合理的 RAFM 钢焊接工艺是提高聚变堆安全性和使用寿命的关键。概述 RAFM 钢的材料特点和应用现状, 然后将适用于 RAFM 钢的焊接技术和工艺进行系统分析, 并对每种焊接技术的原理、国内外相关研究及 RAFM 钢焊接发展现状进行详尽的评述。最后展望了 RAFM 钢激光焊接的应用前景, 指出当前的几种 RAFM 钢几乎都推荐的是激光焊接工艺, 可以得到综合力学性能良好的焊接接头, 并积累了相关数据, 可为我国试验包层模块(Test blanket module, TBM)制造提供关键技术支持, 以全面提升我国核聚变堆发展水平。

关键词: RAFM 钢; 聚变堆; 焊接技术

中图分类号: TG457

Review on Welding Technology of RAFM Steel

WU Shikai^{1,2} ZHANG Jianchao^{1,2} LIAO Hongbin³ WANG Xiaoyu³

(1. Beijing Engineering Research Center of Laser Technology, Beijing 100124;

2. Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124;

3. Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041)

Abstract: The low activation ferritic / martensitic steels (RAFM) are generally considered to be the candidate structural materials for the first wall and blanket of fusion reactors, which service in very harsh environment. This materials especially in it's welding joints will inevitably produce various defects such as irradiation defects, surface embrittlement, chemical etching and redeposition, which seriously affect the service life and safety of the fusion reactor. Welding technology is one of the key technologies for RAFM steel to apply to engineering. The performance and present research progress of RAFM steel are simply introduced, welding methods of RAFM steel and its research progress are reviewed, and potential application of the welding technology of RAFM steel is also pointed out, which provides the basic data for the welding structure of RAFM steel practically apply to the fusion demonstration reactor.

Key words: reduced activation ferritic/martensitic steel; fusion reactor; welding technology

0 前言

能源的开发与利用是人类发展和经济增长的最必要条件, 是人类赖以生存的基础。核聚变是核能释放能量的形式之一, 如果能够控制核聚变反应, 使之服务于人类, 则可以足够人类使用上万年, 近

似认为取之不尽。作为国际最大的合作项目——国际热核聚变试验堆计划(ITER 计划), 其关键部件的研制对焊接技术提出了迫切的需求^[1]。

聚变堆中最靠近等离子体的试验包层模块, 辐射源直接作用于模块表面, 构成对第一壁的能量沉积、中子辐射损伤以及其他等离子体与壁相互作用的过程。材料问题是核聚变堆可否实现最终商业应用的瓶颈问题之一, 第一壁试验包层模块材料在使用中应能在聚变堆的严酷的辐照、热、

* 政府间国际科技创新合作专项磁约束核聚变能发展研究资助项目 (2017YFE0300601)。20180612 收到初稿, 20180904 收到修改稿

化学和应力工况下保持机械完整性和尺寸稳定性,即除了必须具有较高的力学性能以外还需具有耐高温、抗辐照、耐腐蚀等性能,同时还需具有良好的焊接性能^[2-4]。为了保障聚变堆的安全运行和减少高放射性废物的数量,世界各国聚变计划都着手研究发展低活化结构材料,主要包括低活化铁素体/马氏体钢、钒基合金及 SiC/SiC 复合材料等。与其他正在发展的低活化结构材料相比,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第一壁包层的首选结构材料^[5]。

焊接技术是核聚变堆工程制造中不可缺少的关键技术,同时,焊接技术和工艺是 RAFM 钢走向工程应用的关键技术之一^[6]。RAFM 钢合金元素含量较高,在其制造过程中,特别是对焊接提出了更加苛刻的要求。合金元素含量较高的钢种在焊接过程中,溶池金属流动性差,使焊接接头各区域的性能、组织和化学成分存在着较大差异。同时,焊接接头容易出现焊缝区硬化、时效、热影响区软化以及冷裂纹等焊接缺陷,焊接工艺的优良也会对低活化铁素体/马氏体钢的抗腐蚀性造成较大影响。另外,电弧焊焊缝金属经辐照后还可能会产生辐照脆化、辐照肿胀等现象^[7]。因此,为了适应聚变堆试验包层模块的服役环境,探索 RAFM 钢的可靠焊接技术是十分必要的。

表 2 RAFM 钢的主要化学成分(质量分数(%))

类型	Fe	Cr	W	C	V	Ta	Mn	Si	N
CLF-1	Bal.	8.54	1.34	0.088	0.29	0.14	0.62	0.025	0.021
CLAM	Bal.	8.98	1.55	0.11	0.21	0.15	0.40	0.01	0.02
EUROFER 97	Bal.	8.82	1.10	0.10	0.19	0.068	0.37	0.005	0.021
F82H	Bal.	8	2	0.10	0.20	0.04	0.30	0.10	0.01
JLF-1	Bal.	8.87	1.90	0.10	0.19	0.084	0.48	0.24	0.024

国际上的研究主要集中在材料的工艺性、焊接接头的组织微观结构、力学性能以及辐照前后的组织和力学性能的变化等方面,如焊接接头的微观结构、室温下的断裂韧性、辐照前后焊接接头性能的对比等,所用焊接方法包括 TIG(Tungsten inert gas arc welding)焊^[17-18]、热等静压扩散焊(Hot isotatic pressure welding, HIP)^[19-20]、电子束焊(electron beam welding, EB)^[21-22]、激光焊(Laser beam welding, LBW)^[23-24]、搅拌摩擦焊^[25]等。国内对 RAFM 钢焊接的研究起步较晚,与此同时,相比 F82H 及 EUROFER-97 钢等的焊接性研究,CLF-1、CLAM 钢的激光焊接数据还是空白。

1 RAFM 钢的发展现状

目前世界各国均在发展和研究各自的 RAFM 钢,通过 W、Ta、V 或 Ti 和 Mn 等合金元素来取代普通钢中的 Mo、Nb 和 Ni 等,以保证其具有低活化特性,如日本的 F82H^[8-9]和 JLF-1^[10],欧洲的 EUROFER97 以及美国的 9Cr-2WVTa^[11-13]等。近年,我国 RAFM 钢的研究也取得了较大进展,开发出了以 CLAM 钢、CLF-1 钢为代表的具有自主知识产权的低活化铁素体/马氏体钢,其合金化机制是以 9Cr-Mo 为参考,以 W 元素来取代 Mo 元素^[14-15]。W 元素对钢材固溶强化有重要作用,CLF-1 钢中的 W 元素可以使其抗拉强度大大提高,且能降低材料本身的韧脆转变温度,其中 W 元素约占基材的 1.34%,高于 EUROFER 97 钢的 1.1%,使得 CLF-1 钢保持足够的蠕变强度,而且降低了含 W 量为 2% 的 F82H 钢在焊接热影响区出现 Laves 相致使脆性增加的可能^[16]。RAFM 钢常见的热处理工艺及组织特点如表 1 所示,主要化学成分见表 2。

表 1 常见 RAFM 钢的热处理工艺及组织特点

类型	热处理	回火	组织
CLF-1	980 °C/45 min	740 °C/90 min	完全马氏体
CLAM	980 °C/30 min	760 °C/90 min	完全马氏体
EUROFER-97	980 °C/30 min	760 °C/90 min	完全马氏体
F82H	1 040 °C/40 min	750 °C/60 min	马氏体
JLF-1	1 050 °C/60 min	780 °C/60 min	铁素体

2 RAFM 钢焊接研究进展

2.1 钨极氩弧焊(TIG)

TIG 焊是众多焊接方法中最普遍的一种方法。乔建生等^[26]对 CLAM 钢进行 Y 型及双 Y 型窄间隙坡口 TIG 焊接,研究焊接接头显微组织与显微硬度之间的联系机制,通过透射电镜对材料的显微形貌及主要析出相进行观察和分析,结果表明,焊缝区无缩孔及裂纹等明显缺陷,焊缝及母材显微组织都主要为板条马氏体组织,析出相均为 $M_{23}C_6$ 型碳化物,为了消除焊缝区硬化的现象,还需要进行

710 °C/1 h 焊后热处理。

NISHIMURA 等^[27]对 25 mm 厚 JLF-1 钢进行 TIG 焊接, 对焊缝横向、纵向及母材进行拉伸测试, 结果显示, 焊缝抗拉强度明显高于母材, 并通过 J-R 曲线对焊缝及母材不同厚度 CT 试样分别进行断裂韧性测试, 研究发现, JLF-1 钢冲击韧性良好, 即使该钢焊接接头具有一定焊接缺陷, 其断裂韧性也很可观。INOUE 等^[28]对 JLF-1 钢 TIG 焊接头焊缝、热影响区及母材显微组织进行分析研究, 并对各区域显微硬度及接头力学性能进行了测量, 揭示了显微组织与各区域硬度之间的关系, 研究表明, TIG 焊接头金属显微硬度随着板条马氏体尺寸的增大而显著降低。

ZHU 等^[29]通过 TIG 焊对 CLAM 钢进行焊接, 随后对接头进行一定的焊后热处理, 系统分析了焊接接头显微组织与力学性能之间的内在联系机制, 结果表明, 接头存在焊缝硬化及热影响区软化的问题, 但抗拉强度很高, 随着焊后热处理温度的升高焊缝区显微硬度逐渐下降(图 1), 焊缝冲击吸收功也随之增加, 优化后的热处理工艺参数为 760 °C/30 min, 焊缝金属显微组织主要为回火马氏体, 且有碳化物析出相 $M_{23}C_6$ 析出, 综合力学性能良好。

图 1 焊态及不同焊后热处理条件下接头显微硬度分布^[29]

在有关 RAFM 钢 TIG 焊接研究中发现, 该材料无焊接裂纹敏感性, 所以在对该类钢焊接时不需要对其进行焊前预热。相比于其他焊接方法, TIG 焊具有较大的焊接间隙适应量, 但存在明显的接头硬化及热影响区软化的问题, 必须经过适当的焊后热处理, 焊接接头综合性能才会有一定提高。

2.2 热等静压扩散焊(HIP)

聚变堆 TBM 模块中有较多的面接封闭焊缝结构, 结构部件异常复杂, 传统弧焊工艺难以实现, 考虑到热等静压扩散焊工艺特点, 国内外对 RAFM 钢扩散焊进行了大量研究。

LUCON 等^[30]分别通过扩散焊和 TIG 焊对 EUROFER 97 钢进行焊接, 研究了辐照前后焊接接

头显微组织及力学性能, 结果表明, 经辐照处理扩散焊接头综合力学性能良好, 接近母材水平, 而 TIG 焊接头综合力学性能较差, 因此, 对于 EUROFER 97 钢, 扩散连接较 TIG 焊接更具发展前景。

FU 等^[31]研究了 9Cr-ODS(氧化物弥散强化)与 JLF-1 钢异种金属热等静压扩散连接, 对 HIP 接头各区域进行焊后热处理前后显微硬度测量, 研究了显微组织与硬度之间的联系, 结果表明, 经正火加回火焊后热处理, 两侧母材显微硬度恢复焊前状态, 但界面结合区域附近存在软化现象, 这是由于该区域焊接及焊后热处理过程中分别有碳化物 M_3C 和 $M_{23}C_6$ 析出。并且 FU 等^[32]还进行了 5 mm 厚 9Cr-ODS 与 JLF-1 钢之间电子束对接焊试验, 借助四点弯曲试验和有限元模拟的方法对焊缝区室温及 550 °C 高温抗拉强度进行精确测量, 接头室温和高温抗拉强度分别为 854 MPa、505 MPa。

中科院等离子体物理研究所李春京等^[33]对 CLAM 钢热等静压扩散焊接进行初步研究, 研究结果表明, 扩散焊接可以得到无明显空隙等缺陷的焊接接头, 如图 2 所示^[33], 接头抗拉强度很高, 接近母材水平, 但接头冲击韧性较差, 冲击断口为原接合面, 初步认为是由于待焊表面存在一定程度的强氧化物聚集, 从而严重影响接头的冲击韧性。

图 2 CLAM 钢 1 150 °C/4 h 扩散焊接头光学显微照片(×500)

张志云^[34]对 CLF-1 钢进行真空扩散焊接, 对焊接接头显微组织、硬度分布、力学性能及断口形貌进行多方面研究, 优化后的焊接工艺参数为 1 100 °C、15 MPa、150 min, 界面结合率高达 94.3%, 焊缝区显微组织为板条马氏体组织, 拉伸断裂位置位于母材侧, 综合力学性能优良。

2.3 电子束焊(EBW)

为了进一步提高焊接接头性能, 国内外对 RAFM 钢电子束焊接工艺进行了大量研究。FU 等^[35]采用电子束对 7 mm F82H 和 316L 不锈钢异种金属进行焊接, 并对不同温度焊后热处理、中子辐射前后显微硬度及冲击韧性进行系统研究, 结果表明,

接头焊缝区硬度与母材相似,而靠近 F82H 侧热影响区组织由 δ -铁素体及板条马氏体组成,显微硬度明显高于母材,研究发现 750 °C/1 h 焊后热处理可以完全消除热影响区硬化现象,但温度过高会导致母材轻微软化,进而对经 680 °C/1 h 焊后热处理接头进行中子辐照(BR-II)试验,发现焊缝区及母材显微硬度变化不明显,而热影响区特别是细晶区发生明显辐照硬化现象,各区域脆韧转变温度提高,但仍保持良好的冲击韧性。

SAWAI 等^[36]对 15 mm F82H 钢分别进行 TIG 和 EB 焊接并进行 720 °C/1 h 焊后热处理,对比研究了焊接接头显微组织及力学性能,结果显示, TIG 焊接接头焊缝金属主要为板条马氏体组织,出现焊缝硬化和热影响区软化现象,而电子束焊接接头,焊缝硬化现象更加明显,但热影响区无明显软化(图 3)。进而对两种接头进行热时效处理,研究结果发现,热时效温度和时间分别为 550 °C、3 000 h 时,接头硬度明显下降,而母材硬度无明显变化,时间延长至 10 000 h,熔合区显微硬度变化不明显;而温度提高至 650 °C 时,母材硬度显著下降。同时发现焊缝金属经热时效处理后沉淀物要少于母材,且晶内及晶界处有 $M_{23}C_6$ 和 Laves 相析出,热时效时间延长将使得析出相数量增多且更加细小。

图 3 F82H 钢焊接接头横截面及显微硬度分布图^[36]

同时 ALAMO 等^[37]对比了 15 mm F82H 钢 TIG 和 EB 两种焊接接头热时效前后拉伸及冲击性能,其中电子束焊接接头为焊态, TIG 焊接接头经 720 °C/1 h 热处理,并对两种焊接接头进行 400 °C 和 550 °C/10 000 h 热时效处理,测试其拉伸和冲击性能,冲击试验结果如图 4 所示^[37]。研究结果表明,热时效前后 TIG 焊接接头抗拉强度较高,接近母材

水平,但冲击韧性较低,仅为母材的 60%,具有很低的伸长率,且电子束焊接接头试验结果非常分散,特别是冲击性能。

图 4 F82H 钢焊接接头的冲击性能

陈路等^[38]对 12 mm 厚 CLF-1 钢开展了电子束焊接试验,焊接接头无气孔、裂纹等明显缺陷,并对其进行 740 °C/1.5 h 焊后热处理,解决了熔合区大量存在链状气孔问题,并对焊接接头显微组织、力学性能及各合金元素分布进行研究,结果表明,经焊后热处理,焊缝区主要为板条马氏体组织,接头抗拉强度略有下降,但冲击韧性明显提高,成功试制了 TBM 包层模块盖板、格板等模拟件,图 5 所示^[38]。

图 5 盖板模拟件焊后成形

核安全 FDS 团队^[39]对 CLAM 钢热等静压扩散焊、TIG 焊及电子束焊进行了一定研究,并使用 TIG 焊及电子束焊成功制备了 1/3 规模试验包层模块,如图 6 所示^[39]。

图 6 1/3 规模试验包层模块

作者课题组对 CLF-1 钢厚板进行真空电子束焊

接试验, 实现了 32 mm 厚板的一次穿透焊接, 焊缝表面成形良好, 无气孔、裂纹等焊接缺陷, 焊接接头横截面呈典型的匙孔穿透焊缝形貌, 见图 7。并对焊接接头显微组织与力学性能进行研究, 结果显示, 焊缝金属主要为粗大的板条马氏体组织; 熔合线附近为马氏体、少量铁素体和少量魏氏体组织的混合组织; 热影响区主要由马氏体和残余奥氏体组成, 且晶粒尺寸由焊缝向母材依次减小; 经 710 °C/240 min 的焊后热处理, 焊缝区显微硬度均值为 350 HV_{0.1}, 存在明显的硬化现象, 但接头室温及 550 °C 高温抗拉性能良好, 拉伸断裂位置位于远离焊缝的母材侧, 经 180°侧弯试验, 焊缝表面无肉眼可见裂纹(图 8), 焊接接头具有较好的力学性能^[40]。

图 7 CLF-1 钢电子束焊接接头

图 8 CLF-1 钢电子束焊接接头力学性能试验结果

2.4 激光焊(LBW)

以上焊接方法难以适应复杂多层结构的包层模块, 考虑到激光焊接有着传统焊接技术无法取代的优势, 其焊接速度快, 热输入量小, 焊缝热影响区小, 避免了热影响区的软化, 焊件变形小、残余应力低且强度高, 同时激光焊接受工件空间的约束较小, 可实现常规焊接方法无法实现的结构连接; 核聚变反应堆试验包层模块(TBM)为复杂多层结构, 且存在 2~35 mm 多种不同厚度结构, 只有激光焊接工艺可以实现其结构要求, 激光焊接技术是其制造的唯一可选手段^[41]。

AUBERT 等^[42]对 EUROFER 97 钢激光焊、电

子束焊及 TIG 焊焊接接头组织及力学性能进行了研究, 焊接厚度可达 40 mm, 焊缝金属均为细小的板条马氏体组织, 热影响区马氏体板条内有碳化物沉淀析出, 且都存在接头硬化和蠕变性能降低现象, 对焊接接头进行 750 °C/3 h 焊后热处理可将接头综合力学性能恢复至母材水平。CARDELLA 等^[43]对 EUROFER 97 钢的焊接工艺进行了多方面的研究, 先后采用 HIP、TIG 及激光焊的焊接方法, 对接头的显微组织、维氏硬度及力学性能进行了系统研究, 不同焊接接头都需要经一定的焊后热处理, 接头的综合力学性能特别是冲击性能才会恢复至母材水平, 接头横截面如图 9 所示^[43]。

图 9 EUROFER 97 钢焊接接头横截面

作者课题组针对核聚变反应堆试验包层模块(TBM)中使用的 CLF-1 低活化铁素体/马氏体钢进行焊接试验, 采用 15 kW 光纤激光, 实现了 17.5 mm 厚 CLF-1 钢的穿透焊接, 得到了正反表面成型良好, 无明显缺陷的焊接接头, 并对接头显微组织及力学性能进行了分析研究, 接头正、反表面形貌、RT 底片及焊缝横截面如图 10 所示, 并研究了接头各区域显微组织和力学性能, 同时探讨了焊后热处理对接头显微组织、碳化物析出相及力学性能的影响规律^[44]。

结果显示, 焊缝熔合区主要由粗大的板条马氏体组成, 熔合线附近热影响区为细小的板条马氏体和少量贝氏体, 不完全淬火区为经焊接热循环作用下二次回火的回火索氏体及马氏体双相组织^[44], 经焊后热处理焊缝处板条马氏体发生了多边形碎化, 转变为回火马氏体组织, 板条处析出大量弥散分布椭圆形纳米级 $M_{23}C_6$ 型碳化物析出相, 见图 11, 接头室温及 550 °C 高温抗拉强度较高, 均断裂于母材; 焊缝显微硬度高于母材, 且热影响区无明显软化, 焊后热处理使得该区域显微硬度显著下

降, 接头冲击韧性良好, 接头具有良好的综合力学性能。

图 10 17.5 mm CLF-1 钢激光焊接接头^[44]

图 11 激光焊接接头不同热处理条件下的焊缝区 TEM 图

同时, 采用窄间隙坡口激光填丝多道焊的方法实现了 35 mm 厚 CLF-1 低活化铁素体/马氏体钢的焊接。焊后观察并分析了接头不同区域的组织特征, 通过接头的拉伸、冲击试验及显微硬度评定了接头的性能, 接头表面及形貌如图 12 所示^[45]。由于焊丝成分与母材相同, 避免了活化元素的引入。填丝层焊缝中心出现较粗大的柱状晶, 为粗大的板条马氏体组织, 层间结合良好, 晶粒尺寸明显大于打底层, 靠近熔合线附近热影响区为细小的板条马氏体及少量碳化物, 填丝层晶粒尺寸较打底层稍大。对填丝层上部及下部进行力学性能测试, 填丝层同样出现焊缝硬化现象, 经焊后热处理, 焊缝金属硬度有所下降, 焊接接头具有很高的抗拉强度(图 13), 但填充层焊缝区下部及上部室温冲击功出现较大的离散度, 经焊后热处理, 冲击韧性改善不明显。

基于以上 CLF-1 钢焊接性的研究, 完成了 TBM 包层模块中的零部件的激光焊接制造, 见图 14。

图 12 35 mm CLF-1 钢窄间隙激光填丝焊接接头

图 13 35 mm CLF-1 钢激光焊接接头拉伸试验结果

图 14 TBM 包层模块部件

3 展望

RAFM 钢焊接主要问题为接头容易出现焊缝区硬化、冲击韧性差以及冷裂纹等焊接缺陷。冲击韧性与显微组织及析出相及其分布密切相关, 同时考虑到填充层的层间过渡及合金元素的烧损及偏析, 有效的改善其冲击韧性是今后工作的重点。尽管用于 RAFM 钢的焊接方法有多种, 但每种焊接方法都有自身的优点与局限性, 通过国内外文献调研发现, 当前的几种 RAFM 钢中几乎都推荐的是激光焊接工艺, 得到了综合力学性能良好的焊接接头, 并积累了相关数据, 对 RAFM 钢焊接性进行深入系统的研究, 相关结果可为聚变堆 TBM 模块制造提供关键技术支撑。

参 考 文 献

- [1] KLUEH R L, GELLES D S, JITSUKAWA S, et al. Ferritic/martensitic steels: Overview of recent results[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2002, 307-311: 455-465.
- [2] 黄群英, 郁金南, 万发荣, 等. 聚变堆低活化马氏体钢的发展[J]. *核科学与工程*, 2004, 1: 56-64.
HUANG Qunying, YU Jinnan, WAN Farong, et al. The development of low activation martensitic steels for fusion reactor[J]. *Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering*, 2004, 1: 56-64.
- [3] 吴小虎, 赵飞, 谢文佳, 等. 低活化马氏体钢激光焊接接头的组织与性能[J]. *中国激光*, 2010, 37(2): 577-580.
WU Xiaohu, ZHAO Fei, XIE Wenjia, et al. Microstructures and mechanical properties of laser weld joints of reduced activation martensitic steel[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(2): 577-580.
- [4] 黄群英, 李春京, 李艳芬, 等. 中国低活化马氏体钢 CLAM 研究进展[J]. *核科学与工程*, 2007(1): 41-50, 85.
HUANG Qunying, LI Chunjing, LI Yanfen, et al. R&D status of China low activation martensitic steel[J]. *Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering*, 2007(1): 41-50, 85.
- [5] HISHINUMA A, KOHYAMA A, KLUEH R L, et al. Current status and future R & D for reduced-activation ferritic/martensitic steels[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 1998, 258: 193-204.
- [6] RIETH M, REY J. Specific welds for test blanket modules[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2009, 386-88: 471-474.
- [7] RENSMAN J, VAN OSCH E V. Post-irradiation mechanical tests on F82H EB and TIG welds[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2000, 283: 1201-1205.
- [8] KISHIMOTO H, MURAMATSU Y, ASAKURA Y, et al. Destructive and non-destructive evaluation methods of interface on F82H HIPed joints[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2016, 109: 1744-1747.
- [9] HIROSE T, SHIBA K, SAWAI T, et al. Effects of heat treatment process for blanket fabrication on mechanical properties of F82H[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2004, 329: 324-327.
- [10] LI Y, HUANG Q, WU Y, et al. Mechanical properties and microstructures of China low activation martensitic steel compared with JLF-1[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2007, 367: 117-121.
- [11] POITEVIN Y, AUBERT P, DIEGELE E, et al. Development of welding technologies for the manufacturing of European Tritium Breeder blanket modules[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2011, 417: 36-42.
- [12] TANIGAWA H, HIROSE K, SHIBA K, et al. Technical issues of reduced activation ferritic/martensitic steels for fabrication of ITER test blanket modules[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2008, 83: 1471-1476.
- [13] KURTZ R J, ALAMO A, LUCON E, et al. Recent progress toward development of reduced activation ferritic/martensitic steels for fusion structural applications[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2009, 386: 411-417.
- [14] YU J N, HUANG Q Y, WAN F R, et al. Research and development on the China low activation martensitic steel (CLAM) [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2007, 367: 97-101.
- [15] ZHOU X S, DONG Y T, LIU C X, et al. Transient liquid phase bonding of CLAM/CLAM steels with Ni-based amorphous foil as the interlayer[J]. *Materials & Design*, 2015, 88: 1321-1325.
- [16] WANG P H, CHEN J M, FU H Y, et al. Technical issues for the fabrication of a CN-HCCB-TBM based on RAFM steel CLF-1[J]. *Plasma Science & Technology*, 2013, 15: 133-136.
- [17] 邵奇栋. 中国低活化马氏体钢 TIG 焊微观组织与力学性能的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2009.
SHAO Qidong. Microstructures and mechanical properties of TIG welded joint of CLAM steel[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2009.
- [18] 顾康家. CLAM 钢 TIG 焊组织与性能的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2009.
GU Kangjia. Microstructures and mechanical properties of CLAM steel in TIG Weld[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2009.
- [19] VON DER WETH A, KEMPE H, AKTAA J, et al. Optimization of the EUROFER uniaxial diffusion weld[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2007, 367: 1203-1207.
- [20] BASUKI W W, AKTAA J. Process optimization for diffusion bonding of tungsten with EUROFER97 using a vanadium interlayer[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2015, 459: 217-224.
- [21] COMMINS L, RIETH M, WIDAK V, et al. Characterization of ODS (oxide dispersion strengthened) Eurofer/Eurofer dissimilar electron beam welds[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2013, 442: S552-S556.
- [22] CHEN L, WANG Z M, TAO H Y, et al. Research on electron beam welding for CLF-1 reduced activation ferritic/martensitic steel[J]. *Welding Technique*, 2014, 43: 26-29.

- [23] WU S K, ZOU J L, XIAO R S, et al. Ultra-narrow-groove laser welding for heavy sections in ITER[J]. *Welding Journal*, 2016, 95(8): 300S-308S.
- [24] CHEN S H, HUANG J H, LU Q, et al. Microstructures and mechanical properties of laser welding joint of a CLAM steel with revised chemical compositions[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2016, 25: 1848-1855.
- [25] NOH S, ANDO M, TANIGAWA H, et al. Friction stir welding of F82H steel for fusion applications[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2016, 478: 1-6.
- [26] 乔建生, 赵飞, 黄依娜, 等. CLAM 钢的钨极氩弧焊及焊接后的结构与性能[J]. *核科学与工程*, 2008, 28(4): 354-361.
- QIAO Jiansheng, ZHAO Fei, HUANG Yina, et al. The microstructure and mechanical properties of China low activation martensitic steel joined by tungsten inert gas welding[J]. *Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering*, 2008, 28(4): 354-361.
- [27] NISHIMURA A, INOUE N, MUROGA T. Fracture toughness of low activation ferritic steel (JLF-1) weld joint at room temperature[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 1998, 258: 1242-1247.
- [28] INOUE N, MUROGA T, NISHIMURA A, et al. Correlation between microstructure and hardness of a low activation ferritic steel (JLF-1) weld joint[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 1998, 258: 1248-1252.
- [29] ZHU Q, LEI Y C, CHEN X Z, et al. Microstructure and mechanical properties in TIG welding of CLAM steel[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2011, 86: 407-411.
- [30] LUCON E, LEENAERS A, VANDERMEULEN W, et al. Post-irradiation mechanical properties of three EUROFER97 joints[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2008, 83: 620-624.
- [31] FU H Y, NAGASAKA T, MUROGA T, et al. Microstructural characterization of a diffusion-bonded joint for 9Cr-ODS and JLF-1 reduced activation ferritic/martensitic steels[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2014, 89: 1658-1663.
- [32] FU H Y, NAGASAKA T, MUROGA T, et al. Plastic deformation behavior and bonding strength of an EBW joint between 9Cr-ODS and JLF-1 estimated by symmetric four-point bend tests combined with FEM analysis[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2016, 102: 88-93.
- [33] 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): 55-58.
- LI Chunjing, HUANG Qunying, WU Yican, et al. Preliminary study on hot isostatic pressing diffusion welding for China low activation martensitic (CLAM) steel[J]. *Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering*, 2007(1): 55-58.
- [34] 张志云. CLF-1 低活化马氏体钢的真空扩散焊研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- ZHANG Zhiyun. Research on vacuum diffusion bonding of CLF-1 low activation martensite steel[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [35] FU H Y, NAGASAKA T, KOMETANI N, et al. Effect of post-weld heat treatment and neutron irradiation on a dissimilar-metal joint between F82H steel and 316L stainless steel[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2015, 98-99: 1968-1972.
- [36] SAWAI T, SHIBA K, HISHINUMA A. Microstructure of welded and thermal-aged low activation steel F82H IEA heat[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2000, 283: 657-661.
- [37] ALAMO A, CASTAING A, FONTES A, et al. Effects of thermal aging on the mechanical behavior of F82H weldments[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2000, 283: 1192-1195.
- [38] 陈路, 王泽明, 陶海燕, 等. CLF-1 低活化铁素体/马氏体钢真空电子束焊接研究[J]. *焊接技术*, 2014, 43(5): 26-29.
- CHEN Lu, WANG Zheming, TAO Haiyan, et al. Research on electron beam welding for CLF-1 reduced activation ferritic/martensitic steel[J]. *Welding Technology*, 2014, 43(5): 26-29.
- [39] HUANG Q Y, FDS. Development status of CLAM steel for fusion application[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2014, 455: 649-654.
- [40] 王灿, 廖洪彬, 王传强, 等. 低活化铁素体/马氏体钢厚板真空电子束焊接接头组织和性能研究[J]. *机械制造文摘-焊接分册*, 2018(3): 9-14.
- WANG Can, LIAO Hongbin, WANG Chuanqiang, et al. Microstructure and mechanical properties of vacuum electron beam welded joints of reduced activation Ferritic/Martensitic CLF-1 Steel Heavy Plate[J]. *Welding Digest of Machinery Manufacturing*, 2018(3): 9-14.
- [41] AUBERT P, TAVASSOLI F, RIETH M, et al. Review of candidate welding processes of RAFM steels for ITER test blanket modules and DEMO[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2011, 417: 43-50.
- [42] ZHANG J C, WU S K, LIAO H B, et al. Microstructure and mechanical properties of fiber laser welded joints of reduced activation ferritic/martensitic CLF-1 steel heavy plate[C]//The Proceedings of the International Conference of IIW 2017. The 70th IIW Annual Assembly and

- International Conference. Shanghai, Jun. 28, 2017.
- [43] CARDELLA A, RIGAL E, BEDEL L, et al. The manufacturing technologies of the European breeding blankets[J]. Journal of Nuclear Materials, 2004, 329: 133-140.
- [44] 张建超, 乔俊楠, 吴世凯, 等. 低活化铁素体/马氏体钢厚板光纤激光焊接接头组织及力学性能研究[J]. 焊接学报, 2018, 39(4): 124-128.
- ZHANG Jianchao, QIAO Junnan, WU Shikai, et al. Microstructure and mechanical properties of fiber laser welded joints of reduced activation ferritic/martensitic CLF-1 steel heavy plate[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2018, 39(4): 124-128.
- [45] WU S K, ZHANG J C, YANG J X, et al. Investigation on microstructure and properties of narrow-gap laser welding on reduced activation ferritic/martensitic steel CLF-1 with a thickness of 35mm[J]. Journal of Nuclear Materials, 2018, 503: 66-74.
-
- 作者简介: 吴世凯(通信作者), 男, 1976 年出生, 博士, 副研究员。主要研究方向为激光电弧复合焊接、先进材料激光焊接技术。
E-mail: wushikai@bjut.edu.cn