

ODS 钢搅拌摩擦焊接头的微观组织及其高温力学性能

张 静, 韩文妥, 常永勤, 万发荣

(北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 采用搅拌摩擦焊(friction stir welding, FSW)技术对氧化物弥散强化(oxide dispersion strengthen, ODS)铁素体钢进行了焊接, 并对焊接工艺进行了优化. 当转速为 150 r/min, 焊接速度为 30 mm/min 时可以获得无焊接缺陷的 ODS 钢焊接接头. 结果表明, 采用 FSW 焊接的 ODS 钢接头的微观组织出现明显的洋葱环结构, 搅拌区为等轴再结晶晶粒, 前进侧热机影响区表现出明显的塑性流动的特征, 热影响区的晶粒较母材也发生了明显改变. 接头的高温拉伸性能偏低, 但经过温度 1 150 °C, 时间 1 h 的热处理后, 其高温拉伸性能得到大幅提高, 与母材拉伸性能接近.

关键词: 搅拌摩擦焊; 氧化物弥散强化钢; 显微组织; 高温拉伸性能

中图分类号: TG 406 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2015)10-0009-03

0 序 言

ODS 铁素体钢由于具有良好的抗高温蠕变性能、优异的抗辐照损伤性能、出色的抗氧化和抗腐蚀性能, 被认为是理想的、可用于快中子反应堆和热核聚变反应堆中的包层材料、第一壁材料及高温结构件^[1-4]. 由于 ODS 铁素体钢中存在大量纳米氧化物颗粒, 其焊接问题成为它在核领域大规模应用的瓶颈. 这是由于 ODS 钢中纳米氧化物颗粒的比重比焊缝区熔融态金属的比重小, 采用传统的熔焊方式会导致氧化物粒子随着焊缝金属的熔化向焊缝表面上浮, 从而破坏了氧化物粒子在钢中的弥散分布状态, 造成 ODS 钢焊接接头处的高温蠕变性能和抗辐照性能大大降低^[5]. 搅拌摩擦焊是在焊接过程中被焊材料并没有发生熔化, 也不会出现传统熔焊中氧化物粒子上浮的现象, 因此 FSW 技术被认为是连接 ODS 钢最可行的方法之一^[6,7]. 截止目前, 国际上仅对 ODS 钢 FSW 的可焊接性和接头宏观组织特征进行了初步的探索^[6-10], 对于 13Cr-ODS 铁素体钢 FSW 焊接接头的晶粒特点和高温力学性能的研究尚未见报道. 文中详细探讨了 13Cr-ODS 钢 FSW 焊接参数的选择和优化, 并分析了优化条件下焊接区的微观组织形貌及其高温力学性能.

1 试验方法

试验采用搅拌摩擦焊机来焊接 ODS 钢. 选取表面成型良好、内部无焊接缺陷的 FSW 接头进行了金相组织观察和高温力学性能测试. 金相试样所用腐蚀液为硝酸: 盐酸: 水 = 1: 3: 4, 试样的腐蚀时间为 85 s. 高温拉伸试验的温度为 700 °C, 加载应变速率为 $1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 保护气体为氩气, 试样形变过程的测量和记录通过激光束测量分析系统完成. 采用透射电镜观察样品的微观组织形貌.

2 试验结果与讨论

2.1 FSW 工艺参数的选择与优化

对钢、铝合金、钛合金等多种金属和合金的 FSW 研究表明^[11-13], 搅拌头的旋转速度和焊接速度会对焊缝的成型、焊接缺陷的产生和接头的力学性能等产生明显的影响. 文中对 13Cr-ODS 钢进行了多组不同搅拌头转速和焊接速度的 FSW 试验.

首先根据已报道的焊接参数 (600 r/min, 50 mm/min)^[5]进行了 FSW 焊接试验, 结果表面出现了明显的焊接沟槽, 说明焊接过程中热输入过高, 焊缝金属被大量挤出焊缝区域. 这是由于试验所选用的 W-Re 合金搅拌头与文献[5]所用的 pcBN 搅拌头材质不同造成的. pcBN 搅拌头低的摩擦系数和高的导热系数使得搅拌头与被焊接材料间的摩擦产热

效率较低,在相同的焊接参数下,采用 W-Re 合金搅拌头比 pcBN 使得被焊接试件的温度偏高,因此会出现本试验中采用 W-Re 搅拌头焊接 ODS 钢金属被挤出焊缝区的现象. 降低 FSW 的焊接热输入,选择 150 r/min, 30 mm/min; 200 r/min, 50 mm/min 和 300 r/min, 120 mm/min 时可以获得表面成型良好的焊缝. 但是 X 射线无损检测结果显示, 200 r/min, 50 mm/min 和 300 r/min, 120 mm/min 的接头内部存在贯穿焊缝的缺陷. 而 150 r/min, 30 mm/min 的接头内部没有焊接缺陷,接头的截面金相如图 1 所示.



图 1 150 r/min, 30 mm/min 焊接参数下的焊缝形态

Fig. 1 Morphology of welded joint at welding 150 r/min, 30 mm/min parameter

2.2 ODS 铁素体钢 FSW 接头微观组织形貌

焊接参数为 150 r/min, 30 mm/min 的焊接接头出现了典型的“脸盆型”特征. 接头按宏观特征分为搅拌区(stir zone, SZ)、热力影响区(thermo-mechanically affected zone, TMAZ)、热影响区(heat affected zone, HAZ)和母材区(base material, BM),前进侧和后退侧分别用 AS(advancing side)和 RS(retreating side)表示,各区位置如图 1 所示.

图 2 所示为 FSW 接头不同区域的金相组织图谱. 图 2a 表明 BM 区经热轧后含有大量的粗大晶粒,且晶粒沿轧向被明显拉长. 与 BM 区相比, SZ 区的晶粒尺寸明显减小,呈现出等轴晶的特征,如图 2b 所示. 图 2c 和图 2d 为 TMAZ 区域的金相照片,可以看出典型的金属塑性流动变形的特征,且 AS-TMAZ 区金属流动特征较 RS-TMAZ 区更为明显. 这是由于前进侧金属塑性流动方向一致,并与搅拌针旋转前进的方向相同,而后退侧金属的流动方向不一致,一方面受到搅拌针向相反于焊接速度方向的作用力,一方面受到沿焊接方向的作用力,这两种反方向的作用力相互冲撞,使得后退侧的变形没有那么明显. HAZ 区域在焊接热作用下,其晶粒形貌较 BM 区也发生了明显改变,如图 2e, f 所示.

图 3 为 13Cr-ODS 钢接头的 TEM 图谱,可以看到 FSW 焊接后, ODS 钢中的氧化物粒子依然保持弥散分布状态,这也说明 FSW 焊接应用于 ODS 钢的可行性.

2.3 接头的高温拉伸性能

图 4 为 13Cr-ODS 钢 FSW 接头在 700 °C 时的高

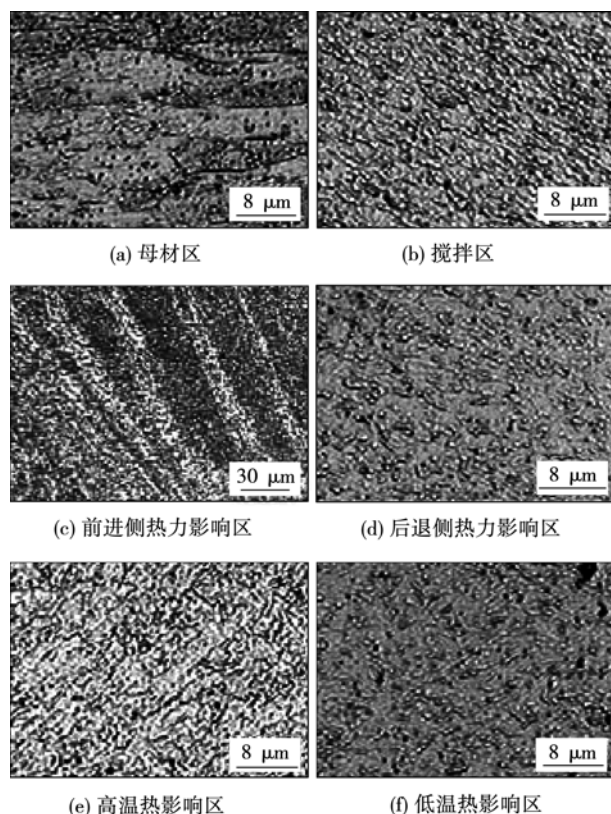


图 2 ODS 钢 FSW 接头的金相组织图谱

Fig. 2 SEM image of welded joint of ODS ferritic steel

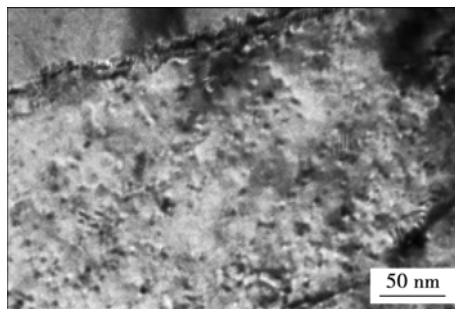


图 3 ODS 钢 FSW 接头的 TEM 图谱

Fig. 3 TEM image for welded joint of ODS ferritic steel

温拉伸性能测试结果. 由图 4 可知, 13Cr-ODS 钢母材在 700 °C 的高温下仍然具有良好的延伸率和高抗拉强度, 这可归因于材料内部弥散分布的纳米氧化物的强化作用以及母材特有的晶粒形貌. 和母材相比, FSW 接头的抗拉强度和延伸率大幅度下降, 且断裂发生在接头 AS-TMAZ 附近. 该区域是力学性能的薄弱区域, 这是因为在前进侧附近区域的搅拌区金属在高速旋转的搅拌头的作用下发生了强烈的塑性变形, 晶粒发生回复和再结晶, 而靠近搅拌区的热力影响区的变形程度和金属的塑性流动性都远远小于搅拌区的塑性金属, 造成速度梯度较大, 成为缺陷易集中区域, 再加上两个区域的组织不同, 中间又缺

乏平滑的过渡,则形成了该区域力学性能薄弱的特点. 再结合 TMAZ 区域的晶粒特点来分析材料的高温拉伸性能,由图 2 可知,接头 TMAZ 的晶粒尺寸与母材相比非常小,细小的晶粒通常具有更多的晶界,虽然常温变形过程中晶界可以阻碍位错的运动并赋予金属材料良好的强度和韧性,但是在高温下金属的形变容易通过晶界的滑移来实现. 随着晶粒尺寸的减少和晶界数量的增加,在变形力的作用下,晶界滑动的变形量会急剧增大,从而导致金属的强度和韧性大幅度降低. 同时,由于接头的 TMAZ 区域在 FSW 过程中同时受到来自于焊接热输入和搅拌头机械作用力的双重影响,在该区域会产生明显的残余应力—拉应力,而且其残余应力水平为整个 FSW 接头的最高水平. 在高温拉伸时,TMAZ 较高的残余拉伸应力也会促进裂纹的起裂和晶界的滑动,从而对接头的高温拉伸性能造成很大的影响.

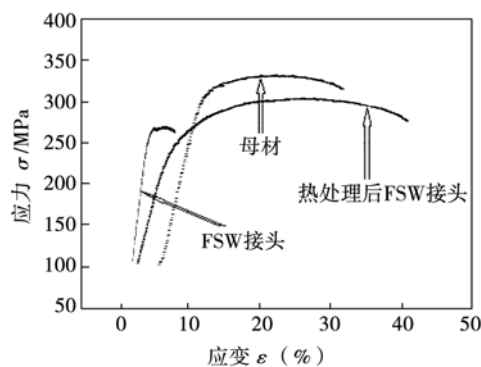


图 4 ODS 钢 FSW 接头在 700 °C 时的高温拉伸性能

Fig. 4 Results of tensile properties at 700 °C of welded joint of ODS ferritic steel

焊接接头在 1 150 °C 热处理 1 h 后,高温拉伸性能显著提高,并接近母材的拉伸性能. 热处理后的断裂位置与焊后未经热处理的接头的位置不同,断裂区域转变为接头 HAZ 附近. 这是由于经过 1 150 °C, 1 h 的热处理后,接头 TMAZ 区发生了回复和晶粒的长大. TMAZ 晶粒长大的驱动力来源于该区域在焊接过程中受搅拌头的机械作用后形成并存储起来的变形能. 在热处理时,这一区域的晶粒释放了焊接过程中储存的变形能,导致了晶粒的长大. 同时热处理也必然影响到接头内部各个区域的残余应力的水平和分布. 接头不同区域在热处理后的残余应力水平降低、分布形式得到改善,对接头高温拉伸性能的提高有所帮助.

3 结 论

文中对 13Cr-ODS 钢 FSW 的焊接工艺条件进行

了优化,并获得了无焊接缺陷的 ODS 钢接头. 发现 13Cr-ODS 铁素体钢的 FSW 过程需要较高的焊接热输入,其焊接参数的可选范围小. 在搅拌头转速为 150 r/min,焊接速度为 30 mm/min 的参数下,可以实现 13Cr-ODS 铁素体钢的表面成型良好、无焊接缺陷的 FSW 连接. 优化工艺获得的 13Cr-ODS 钢接头的微观组织出现明显的洋葱环结构并表现出明显的塑性流动的特征. 其接头的高温拉伸性能表明焊接接头的性能偏低,但经过 1 150 °C, 1 h 的热处理后,其拉伸性能得到大幅度提高,能与母材拉伸性能相媲美.

参考文献:

- [1] Li Y F, Nagasaka T, Muroga T, *et al.* High-temperature mechanical properties and microstructure of 9Cr oxide dispersion strengthened steel compared with RAFMs [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2011, 86(9/11): 2495–2499.
- [2] Dou P, Kimura A, Okuda T, *et al.* Polymorphic and coherency transition of Y-Al complex oxide particles with extrusion temperature in an Al-alloyed high-Cr oxide dispersion strengthened ferritic steel [J]. *Acta Materialia*, 2011, 59(3): 992–1002.
- [3] Yamashita S, Watanabe S, Ohnuki S, *et al.* Effect of mechanical alloying parameters on irradiation damage in oxide dispersion strengthened ferritic steels [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2000, 283–287, Part 1: 647–651.
- [4] Chen Y, Sridharan K, Allen T R, *et al.* Microstructural examination of oxide layers formed on an oxide dispersion strengthened ferritic steel exposed to supercritical water [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2006, 359(1/2): 50–58.
- [5] Legendre F, Poissonnet S, Bonnaillie P, *et al.* Some microstructural characterizations in a friction stir welded oxide dispersion strengthened ferritic steel alloy [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2009, 386–388: 537–539.
- [6] Miao P, Odette G R, Gould J, *et al.* The microstructure and strength properties of MA957 nanostructured ferritic alloy joints produced by friction stir and electro-spark deposition welding [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2007, 367–370, Part B: 1197–1202.
- [7] Han W T, Ukai S, Wan F R, *et al.* Hardness and micro-texture in friction stir welds of a nanostructured oxide dispersion strengthened ferritic steel [J]. *Materials Transaction*, 2012, 53(2): 390–394.
- [8] Noh S, Kasada R, Kimura A, *et al.* Microstructure and mechanical properties of friction stir processed ODS ferritic steels [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2011, 417(1/3): 245–248.
- [9] Wang J Y, Wei Yuan, Mishra R S, *et al.* Microstructure and mechanical properties of friction stir welded oxide dispersion strengthened alloy [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2013, 432(1/3): 274–280.

- AZ31B 焊接工艺[J]. 焊接学报, 2004, 25(3): 31-34.
- Song Gang, Liu Liming, Wang Jifeng, *et al.* Laser tungsten inert-gas arc hybrid welding process on wrought magnesium alloy AZ31B [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(3): 31-34.
- [3] 游德勇, 高向东. 激光焊接技术的研究现状与展望[J]. 焊接技术, 2008, 37(4): 5-9.
- You Deyong, Gao Xiangdong. The research status and prospect of laser welding technology [J]. Welding Technology, 2008, 37(4): 5-9.
- [4] 米谷茂. 残余应力的产生和对策[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [5] 杨德钧, 沈卓身. 金属腐蚀学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003.
- [6] 金晓军, 霍立兴, 张玉凤, 等. 热输入对双相不锈钢管接头力学和腐蚀性能的影响[J]. 焊接学报, 2004, 25(3): 109-112.
- Jing Xiaojun, Huo Lixing, Zhang Yufeng, *et al.* Heat Input on mechanical and corrosion properties of duplex stainless steel tube joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(3): 109-112.
- [7] 龚利华, 张 波, 王赛虎. 超级双相不锈钢焊接接头的耐腐蚀性能[J]. 焊接学报, 2010, 31(7): 59-62.
- Gong Lihua, Zhang Bo, Wang Saihu. Super duplex stainless steel corrosion resistant performance of welded joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(7): 59-62.

作者简介: 陆永浩,男,1967 出生,教授,博士生导师. 主要从事核电材料和应力腐蚀等研究工作. 发表论文 100 余篇. Email: cxy276019209@163.com

[上接第 11 页]

- [10] Chen C L, Tatlock G J, Jones A R. Microstructural evolution in friction stir welding of nanostructured ODS alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 504(1): S460-S466.
- [11] Lakshminarayanan A K, Balasubramanian V, Salahuddin M. Microstructure, tensile and impact toughness properties of friction stir welded mild steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2010, 17(10): 68-74.
- [12] Venkateswaran P, Reynolds A P. Factors affecting the properties of friction stir welds between aluminum and magnesium alloys [J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 545: 26-37.
- [13] Liu H J, Zhou L, Liu Q W. Microstructural evolution mechanism of hydrogenated Ti-6Al-4V in the friction stir welding and post-weld dehydrogenation process[J]. Scripta Materialia, 2009, 61(11): 1008-1011.

作者简介: 张 静,女,1986 年出生,博士研究生. 主要从事核电材料的辐照性、搅拌摩擦焊工艺和机理方面的研究. 发表论文 3 篇. Email: zhangjing11221021@163.com

通讯作者: 常永勤,女,教授. Email: chang@ustb.edu.cn