

Q235 钢搅拌摩擦焊接头微观组织与力学性能分析

周 利^{1,2}, 张仁晓², 舒凤远², 黄永宪¹, 冯吉才^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学(威海) 山东省特种焊接技术重点实验室, 威海 264209)

摘 要: 在焊接速度为 100 mm/min 和搅拌头转速为 450 r/min 的工艺参数下, 采用钨铈合金搅拌头对 3 mm 厚 Q235 钢进行了搅拌摩擦焊试验, 并对接头的微观组织及力学性能进行了研究. 结果表明, 在该工艺参数下可以获得表面无缺陷、成形良好的焊缝. 焊后搅拌头表现出一定程度的磨损及氧化. 接头截面各区域承受不同的热力联合作用, 经历了不同的组织转变过程, 但均保持铁素体和珠光体组织. 接头显微硬度最大值位于焊核区. 接头拉伸断裂位置处于热影响区, 拉伸断口呈韧性断裂特征.

关键词: Q235 钢; 搅拌摩擦焊; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG 453

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.2019400076

0 序 言

钢铁是迄今为止人类使用最为广泛的一种金属材料, 在工业技术的各个邻域都有着广泛的应用. 钢在采用普通熔焊方法时, 由于焊接熔池发生复杂的物理化学变化, 焊缝凝固过程中容易产生焊接冷裂纹、合金元素偏析、热影响区晶粒粗大等问题^[1-3]. 同时, 焊缝在焊后存在较高的残余应力, 易产生应力腐蚀裂纹和疲劳断裂^[4-5].

搅拌摩擦焊 (friction stir welding, FSW) 是一种先进的固相连接技术, 依靠搅拌头与被焊工件之间的摩擦、挤压作用形成焊缝. 该方法热输入低, 不产生焊接熔池, 避免了铸造组织产生, 并通过搅拌头施加剧烈塑性变形细化组织, 从而改善焊接接头的性能^[6]. 目前, 针对低碳钢的搅拌摩擦焊开展了相关研究. Lienert 等人^[7]采用钼基和钨基合金搅拌头在 6.35 mm 厚 AISI1018 热轧钢板上得到了无缺陷的搅拌摩擦焊焊缝, 并且通过实际测量得到搅拌头轴肩上部最高温度大约为 1 000 °C, 推测搅拌区的最高温度超过了 1 100 °C, 甚至可能达到 1 200 °C. Lakshminarayanan 等人^[8]采用钨基合金搅拌头研究了 AISI1018 低碳钢搅拌摩擦焊接头的微观组织和力学性能. 结果表明, 焊核区获得更细的晶粒并含

有一定量的搅拌头磨损颗粒, 焊核区的抗拉强度和硬度比母材高约 8%, 但延展性和冲击韧性较母材有所降低.

文中采用钨铈合金搅拌头对应用广泛的 Q235 钢进行搅拌摩擦焊对接, 并对接头的微观组织和力学性能进行分析, 以期钢铁材料搅拌摩擦焊提供数据参考和理论支持.

1 试验方法

试验材料为 Q235 钢, 属于碳素结构钢, 具有高的塑性、韧性和焊接性能, 良好的压力加工性能, 其化学成分及力学性能如表 1 所示, 板材尺寸为 250 mm × 70 mm × 3 mm. 焊前将试件用角磨机进行打磨处理, 去除表面氧化皮等杂质, 以避免工件表面的氧化物影响焊接质量, 然后用丙酮擦拭, 去除钢板表面的油污, 最后通过夹具牢靠地把工件固定在焊接工作台上, 装夹时工件挤紧压实, 以免造成对接面留有空隙而出现焊接缺陷.

试验中所使用的焊具采用分体式设计, 将夹持部分与搅拌头分开以降低成本. 搅拌头部分采用高温性能良好但价格昂贵的钨铈合金, 而夹持部分采用 SKD61 模具钢以承受转矩和较高的温度. 针对试验所采用工件材料的规格, 合理地设计搅拌头尺寸, 轴肩直径和针长分别为 12 和 2.85 mm; 搅拌针采取圆锥式设计, 针根部直径和端部直径分别为

表1 Q235钢化学成分及力学性能

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of Q235 steel

C	Mn	Si	S	P	Fe	抗拉强度 R_m /MPa	断后伸长率 A (%)
0.16	0.45	0.22	0.024	0.021	余量	390	33

5和3 mm. 焊接工艺参数为焊接速度 100 mm/min、搅拌头转速 450 r/min、下压量 0.1 mm 以及主轴倾角 3°. 考虑到钢搅拌摩擦焊过程中, 搅拌头的温度可能达到 1 000 °C 以上^[7], 因此设计了具有水冷和气体保护功能的焊具系统, 从而保证焊接过程的稳定进行.

焊接结束后, 垂直于焊接方向加工金相试样, 对试件进行逐级粗磨、精磨和抛光, 然后使用浓度为 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀 8~10 s, 采用 DSA510 光学显微镜 (optical microscopy, OM) 观察接头各区域微观组织特征. 利用 ARTCAM-300SSI-C 显微硬度计对接头横截面进行显微硬度分析, 测试点位于焊缝横截面中间层, 间距为 0.5 mm. 按照国家标准 GB/T228—2002《金属材料室温拉伸实验方法》沿垂直于焊接方向截取拉伸试样, 室温拉伸试验在 INSTRON5967 电子万能材料试验机上进行, 拉伸速率为 1.0 mm/min. 拉伸试验结束后, 采用 MERLIN Compact 型扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 对接头拉伸断口形貌进行分析, 以确定拉伸断裂的类型.

2 接头成形与微观组织

采用钨铍合金搅拌头成功地实现了 Q235 钢的搅拌摩擦焊, 图 1a 为所得焊缝表面形貌. 由图可知, 焊缝表面并没有出现表面沟槽等缺陷, 可见在该试验参数下塑变的材料充分流动, 形成了成形良好的焊缝. 焊缝表面光滑均匀, 弧纹连续清晰. 焊缝两侧存在明显的飞边, 这是由于焊接过程中材料热塑性流动过于强烈, 造成部分材料被搅拌头挤压出去, 冷却后在焊缝两边形成翻卷状金属, 即形成了飞边. 同时, 在焊缝末端存在匙孔.

图 1b 为所得接头横截面宏观形貌, 焊缝整体呈“盆地形状”分布. 由于焊接过程中热力联合作用方式的不同, 接头中各区域的组织存在较大差异, 按照其组织构成等特征, 可将接头横截面分为四个区域: 焊核区 (weld nugget zone, WNZ)、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).



(a) 表面形貌



(b) 横截面形貌

图1 搅拌摩擦焊接头成形

Fig. 1 Formation of joint

搅拌头的磨损也是搅拌摩擦焊焊钢的一个关键问题. Nathan 等人^[9]采用 W90, W95, W99 三种搅拌头对 5 mm 厚的 HSLA 钢板进行搅拌摩擦焊焊接, 焊后搅拌头均表现出一定程度的磨损. 在此次焊接过程中可以观察到搅拌头轴肩呈现橘黄色, 处于红热状态, 焊后搅拌头轴肩部分出现一定程度墩粗, 搅拌针发生一定的磨短, 当长时间焊接时表面材料氧化严重, 如图 2b 所示.

图 3 为 FSW 接头各区域的组织形貌, Q235 钢为低碳钢, 其母材组织为典型的铁素体加珠光体组织 (图 3a).

热影响区仅受到温度场的作用, 该区域材料没有受到搅拌针的挤压变形作用并未发生塑性变形, 组织仍为铁素体加珠光体. 同时, 该区域和母材直接接触, 散热较快, 材料在高温停留时间较短, 晶粒有一定程度的长大, 但与母材相比长大趋势不明显 (图 3b).

热力影响区组织仍为铁素体加珠光体. 该区域在焊接过程中经历焊接热循环的同时也受到搅拌头的机械搅拌作用, 发生动态回复和再结晶, 晶粒较为细小且存在沿塑性流动方向分布的被拉长变形晶粒 (图 3c).

焊核区受搅拌头直接作用, 在焊接过程中经历最为显著的热和机械变形作用, 该区域组织也由铁

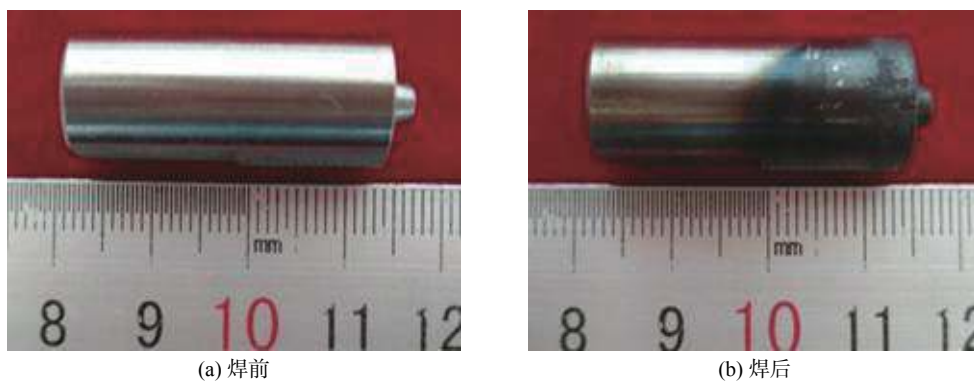


图 2 搅拌头形貌

Fig. 2 Appearance of FSW tool

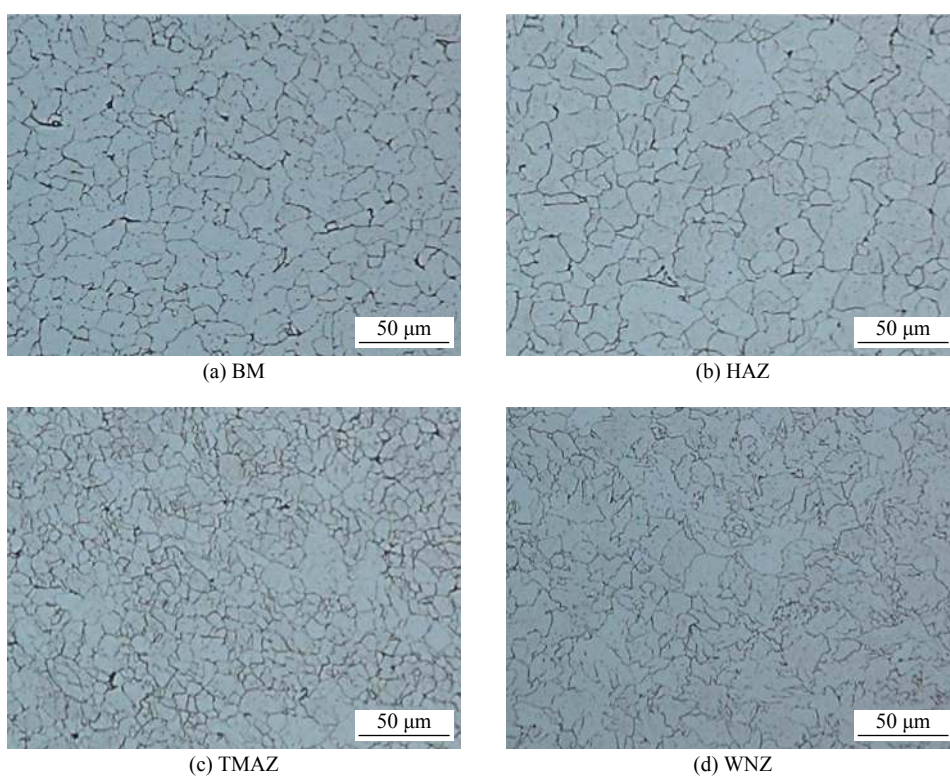


图 3 接头不同区域光学显微组织

Fig. 3 OM microstructure of different regions in joint

素体加珠光体组成 (图 3d). 在焊接过程中, 焊核区受到搅拌头的剧烈搅拌作用, 组织经历强烈的塑性流动, 同时又承受着较高温度的热循环, 变形组织发生动态再结晶, 形成细小的等轴晶粒, 但由于该区高温停留时间较长, 部分晶粒有所长大, 因而在晶粒尺寸分布不太均匀。

3 接头力学性能

3.1 显微硬度

图 4 为所得接头显微硬度分布情况, 接头显微硬度分布曲线呈现中间高, 两边低的趋势。焊核区

显微硬度值在 127 ~ 146 HV 波动, 这是由于焊核区中晶粒尺寸分布不太均匀, 晶粒尺寸较大区域显微硬度值较低, 而晶粒尺寸较小区域显微硬度值较高, 但是焊核区显微硬度值均大于母材, 这是由于焊核区在搅拌针强烈的机械搅拌作用下, 发生完全的动态再结晶过程导致晶粒细化所致。热力影响区较窄, 该区域发生动态回复及再结晶, 晶粒较为细小, 其硬度值也高于母材, 且与焊核区平均硬度值相差不大。热影响区显微硬度与母材相比略有降低, 这是由于热影响区仅受到热循环的作用, 晶粒有一定程度的长大, 导致显微硬度下降, 但其硬度与母材相比变化不大。

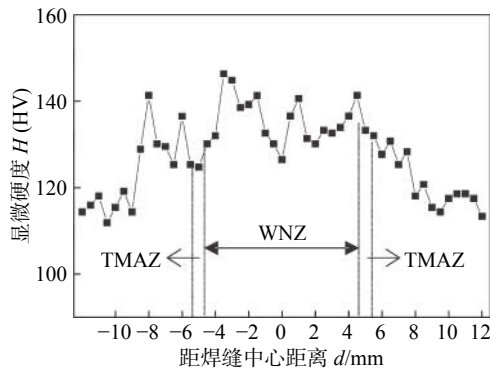


图4 接头显微硬度分布曲线

Fig. 4 Microhardness distribution across joint

3.2 拉伸性能

对所得接头进行拉伸试验,可得到该参数下的抗拉强度约为 377 MPa,略微低于母材强度. 拉伸试样断于焊缝的前进侧或后退侧的热影响区,接头拉伸曲线和断裂位置如图 5 所示. 这表明热影响区是整个焊缝的薄弱区域,该区域在焊接过程中仅受到温度场的作用,其晶粒发生一定程度的粗化,晶粒尺寸较大,力学性能有所降低. 同时,观察到接头断口处有缩颈的产生,可见在断裂之前材料具有较明显的塑性变形.

利用扫描电子显微镜对断口形貌进行分析,所得结果如图 6 所示. 可以看到接头断面上以小尺寸

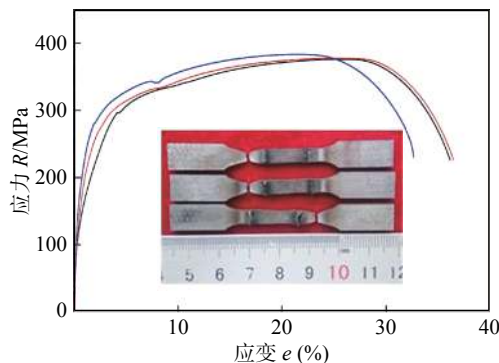


图5 接头拉伸曲线及断裂位置

Fig. 5 Stress strain curve and fracture location of joints

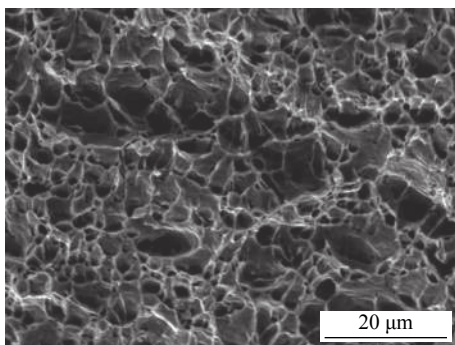


图6 拉伸断口形貌

Fig. 6 Fracture morphology of tensile specimen

的韧窝为主,大尺寸韧窝数量较少. 韧窝是金属塑性断裂的主要特征,因此该接头断裂模式是典型的韧性断裂.

4 结 论

(1) 采用搅拌摩擦焊在焊接速度 100 mm/min 和搅拌头转速 450 r/min 下焊接 Q235 钢可以得到成形良好的焊缝. 焊后搅拌头出现一定程度磨损及氧化.

(2) 热影响区受热的作用,其晶粒有所长大,组织未发生变化,由铁素体和珠光体组成;热力影响区受热循环和机械搅拌的作用,晶粒较为细小且被拉长,但仍为铁素体加珠光体;焊核区受到搅拌针强烈的机械搅拌作用,发生了动态再结晶,形成细小晶粒,其组织为铁素体和珠光体,但是该区晶粒尺寸分布不太均匀.

(3) 接头显微硬度分布曲线呈中间高、两边低的趋势,焊核区显微硬度值在 127 ~ 146 HV 波动;热力影响区硬度值相较于焊核区变化不大;热影响区显微硬度与母材相比略有降低. 拉伸测试结果表明,焊接接头的抗拉强度达到 377 MPa,拉伸接头呈韧性断裂特征.

参考文献:

- [1] 杨建国,黄鲁永,张勇,等. 30CrMnSi 钢 TIG 焊冷裂纹形成机制[J]. 焊接学报, 2011, 32(12): 13 - 16.
Yang Jianguo, Huang Luyong, Zhang Yong, *et al.* Mechanism of cold welding cracks in 30CrMnSi steel joints welded by TIG method[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(12): 13 - 16.
- [2] 王可,郑振太,薛海涛,等. 254SMO/Q235B 异种钢焊接接头显微组织[J]. 焊接学报, 2013, 34(2): 105 - 108.
Wang Ke, Zheng Zhentai, Xue Haitao, *et al.* Microstructure of 254SMO/Q235B dissimilar steel welded joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(2): 105 - 108.
- [3] 陈延清,杜则裕,许良红,等. X80 管线钢焊接热影响区组织和性能分析[J]. 焊接学报, 2010, 31(5): 101 - 104.
Chen Yanqing, Du Zeyu, Xu Lianghong, *et al.* Microstructure and mechanical properties of heat affected zone for X80 pipeline steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(5): 101 - 104.
- [4] 伍强,徐兰英,杨永强,等. 高强钢激光焊接残余应力的研究[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 137 - 143.

- Wu Qiang, Xu Lanying, Yang Yongqiang, *et al.* Study on laser welding residual stress of high strength steel[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(6): 137 – 143.
- [5] 李金泉, 杨化仁, 罗来科. 16Mn 钢焊接件疲劳裂纹萌生与扩展观察 [J]. 南京理工大学学报, 2002, 26(1): 61 – 64.
- Li Jinquan, Yang Huaren, Luo Laike. Observations on the fatigue crack initiation and propagation of 16Mn steel welded structure[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2002, 26(1): 61 – 64.
- [6] 张 静, 韩文妥, 常永勤, 等. ODS 钢搅拌摩擦焊接头的微观组织及其高温力学性能 [J]. 焊接学报, 2015, 36(10): 9 – 11.
- Zhang Jing, Han Wentuo, Chang Yongqin, *et al.* Microstructure and mechanical properties in friction stir welded nanostructured oxide dispersion strengthened steel joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(10): 9 – 11.
- [7] Lienert T J, Stellwag W L, Grimmer B B, *et al.* Friction stir welding studies on mild steel-Process results, microstructures, and mechanical properties are reported[J]. Welding Journal, 2003, 82(1): 1 – 9.
- [8] 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, 2010, 17(10): 68 – 74.
- [9] Nathan S R, Balasubramanian V, Malarvizhi S, *et al.* An investigation on metallurgical characteristics of tungsten based tool materials used in friction stir welding of naval grade high strength low alloy steels[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2016, 56: 18 – 26.
-
- 第一作者简介:** 周 利, 男, 1982 年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师. 主要从事先进固相连接技术及激光复合表面改性方面的科研和教学工作. 发表论文 30 余篇. Email: zhouli@hitwh.edu.cn
- 通信作者简介:** 舒凤远, 男, 博士, 讲师. Email: shufengyuan@hitwh.edu.cn

[上接第 75 页]

- [8] 柏兴旺, 张海鸥, 周祥曼, 等. 外加高频磁场下电弧快速成形过程的电磁-流体耦合数值模拟 [J]. 机械工程学报, 2016(4): 60 – 66, 72.
- Bai Xingwang, Zhang Haiou, Zhou Xiangman, *et al.* Electromagneto-fluid coupling simulation of arc rapid prototyping process with external high-frequency magnetic field[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016(4): 60 – 66, 72.
- [9] Chen Rong, Wang Chunming, Jiang Ping, *et al.* Effect of axial magnetic field in the laser beam welding of stainless steel to aluminum alloy[J]. Materials & Design, 2016, 109(5): 146 – 152.
- [10] 张 涛, 武传松. 穿孔等离子弧焊接热场和流场的数值模拟 [J]. 焊接学报, 2011, 32(7): 87 – 90.
- Zhang Tao, Wu Chuansong. Numerical simulation of temperature field and fluid flow in keyhole plasma arc welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(7): 87 – 90.
- [11] 刘政军, 王晓慧, 苏允海. 外加磁场对镁合金焊接熔池形态的影响 [J]. 焊接学报, 2016, 37(1): 103 – 106.
- Liu Zhengjun, Wang Xiaohui, Su Yunhai. Effect of magnetic field on shape of magnesium alloy weld pool[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(1): 103 – 106.
- [12] Suman Patra, Kanwer Singh Arora, Mahadev Shome, *et al.* Interface characteristics and performance of magnetic pulse welded copper-Steel tubes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 245: 278 – 286.
-
- 第一作者简介:** 刘海华, 男, 1980 年出生, 博士研究生, 主要研究方向为焊接修复及焊接质量控制. 发表论文 10 篇. Email: lh251@163.com
- 通信作者简介:** 李亮玉, 男, 博士研究生导师. Email: liliangyu1965@163.com