

钒微合金化 Q390FRW 钢焊后热处理接头的组织和性能研究

柏钦成¹, 崔永凤¹, 于海宝¹, 解婷婷¹, 韩如东¹, 刘建莹¹, 周书豪^{2*}

(1. 淄博市检验检测计量研究总院, 山东 淄博 255000; 2. 山东理工大学材料科学与工程学院, 山东 淄博 255000)

摘 要:为提升桥梁伸缩缝用钢的综合性能, 制备了一种钒微合金化的耐火耐候 Q390FRW 钢, 研究了药芯气体保护焊(FCAW)与埋弧焊(SAW)及其焊后热处理(PWHT-525 °C×60 min)对接头组织和性能的影响。热力学计算表明, 钒的碳化物(VC)可于 799 °C 析出, 细化晶粒。试验结果表明: FCAW 焊缝组织主要为铁素体与少量马-奥岛, 而 SAW 焊缝则以贝氏体和铁素体为主。经热处理后, 两种焊缝的马-奥岛均发生分解, 晶粒显著细化, 同时促进了钒的碳化物的弥散析出。热处理后, FCAW 接头的抗拉强度与伸长率分别达到 686 MPa 与 33.64%, 其塑性的显著提升主要归因于钒的析出强化与组织稳定化作用。断口分析表明热处理使接头断裂机制由韧脆混合型向韧性断裂转变。

关键词:Q390FRW 钢; 焊后热处理; 钒微合金化; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG44

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2026)03-0164-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.03.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Microstructure and mechanical properties of post-weld heat-treated joints in vanadium microalloyed Q390FRW steel

BAI Qincheng¹, CUI Yongfeng¹, YU Haibao¹, XIE Tingting¹,
HAN Rudong¹, LIU Jianying¹, ZHOU Shuhao^{2*}

(1. Zibo Municipal General Institute of Inspection and Metrology, Zibo 255000, Shandong, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, Shandong, China)

Abstract: To enhance the comprehensive performance of steel for bridge expansion joints, a fire-resistant and weathering-resistant vanadium-microalloyed Q390FRW steel was prepared in this study. The effects of flux-cored arc welding (FCAW), submerged arc welding (SAW), and subsequent post-weld heat treatment (PWHT-525 °C × 60 min) on the microstructure and mechanical properties of the joints were investigated. Thermodynamic calculations indicated that vanadium carbides (VC) can precipitate at 799 °C, contributing to grain refinement. Experimental results showed that the FCAW weld joint consisted mainly of ferrite and a small amount of martensite-austenite (M-A) islands, while the SAW weld joint was primarily composed of bainite and ferrite. After heat treatment, the M-A islands in both weld joints decomposed, grain size significantly refined, and the dispersion precipitation of vanadium carbides was promoted. The tensile strength and elongation of the FCAW joint after heat treatment reached 679 MPa and 33.64%, respectively. The remarkable improvement in plasticity was primarily attributed to the precipitation strengthening and microstructural stabilization effects induced by vanadium. Fracture analysis-

收稿日期: 2026-01-05; 修回日期: 2026-02-06; 接受日期: 2026-02-11

作者简介:柏钦成, 1987 年出生, 男, 山东泰安人, 学士, 高级工程师, 主要从事金属材料的检验检测研究, E-mail: baiqincheng@126.com; *通信作者: 周书豪, 1999 年出生, 男, 安徽淮北人, 硕士研究生, 主要从事金属焊接及焊后热处理相关研究, E-mail: 17862852911@163.com。

is revealed that the heat treatment shifted the fracture mechanism of the joints from a ductile-brittle mixed mode to a ductile fracture mode.

Key words: Q390FRW steel; post-weld heat treatment; vanadium microalloying; microstructure; mechanical properties

0 引言

随着城市化进程的加速,桥梁作为交通基础设施的关键组成部分,正承受着日益增长的交通负荷。在高架桥和大跨径桥梁中,伸缩缝作为重要的结构部分,允许桥梁结构在温度变化下发生必要的位移与变形,有效防止应力集中引起的结构损伤^[1-4]。桥梁伸缩缝的选材及焊接质量直接关系到桥梁的安全性与耐久性。

Q390 钢因其卓越的力学性能与焊接性能,能够承受车辆施加的静载和动载,被广泛应用于桥梁领域^[5]。焊接过程中温度的波动及引起的相变过程显著影响了 Q390 钢的焊后组织和性能,研究表明,通过钒(V)等微合金化元素的添加,可以显著细化钢的晶粒,并形成弥散分布的碳氮化物,从而提高钢的强度、韧性以及高温稳定性^[6]。这种积极作用在与未微合金化钢的对比中尤为明显。例如张元杰等人^[7]在未添加钒的 Q390E 钢埋弧焊接头中,焊缝组织以先共析铁素体(Proeutectoid Ferrite, PF)、侧板条铁素体(Ferrite Side Plate, FSP)和针状铁素体(Acicular Ferrite, AF)为主,其中较多的 FSP 被认为对低温韧性不利。其根本原因在于缺乏钒这类能够抑制晶粒长大并促进有利相变的微合金元素。而钒微合金化技术通过促进细小碳氮化物的析出,为提升桥梁钢的综合性能提供了有效的材料设计途径。然而,钒的微合金化效果如何与不同的焊接工艺及后续的焊后热处理制度产生协同效应,从而实现对焊缝组织与性能的精准调控,仍需针对具体的材料体系进行深入探究。

焊接工艺的选择对焊接接头(Welded joint, WJ)的性能有着显著影响。采用合理的焊接参数可以显著提升 Q390R 钢的力学性能、低温冲击韧性和微观组织构成^[8]。不同焊接方法(如 TIG、CMT 和 FBW)下的 M390 钢焊接接头存在明显的脆性相,晶粒粗大和成分偏析容易导致凝固裂纹产生,降低接头的力学性能^[9]。合理的热处理不仅能消除焊接应力,还能通过调控微合金碳化物的析出过程,进一步提高接头的强韧性。适当的热处理不仅能消除焊接应力,还能提高焊接接头的疲劳强度,增强伸缩缝在实际使用过程中的可靠性和安全性^[10]。

笔者设计了一种钒微合金化的耐火耐候 Q390FRW 钢,系统研究了两种不同焊接工艺下焊缝的微观组织及其对力学性能的影响;通过焊后回火处理,旨在激发钒的析出强化潜力,实现焊缝组织与性能的协同调控,以期钒微合金化桥梁钢在伸缩缝等关键部件中的应用提供数据与理论支持。

1 试验材料与方法

1.1 研究策略与工艺对比方案

为对比不同焊接工艺对钒微合金化 Q390FRW 钢接头性能的影响,研究选取工程中广泛应用的药芯气体保护焊(FCAW)与埋弧焊(SAW)两种典型工艺进行对比。FCAW 与 SAW 在热输入、坡口形式、焊材及冶金过程上存在固有差异,这些差异共同构成了各自的“工艺体系”。研究的核心策略是:在固定母材(Q390FRW 钢)和焊后热处理制度(525 °C×60 min)这两个关键变量的前提下,对比两种完整、优化的工艺体系所制备接头的最终组织与性能。这种基于“工艺”的对比方法,旨在模拟工程选型时的真实场景,其结果对实际生产更具直接指导意义。两种工艺的具体参数均依据相关标准及工程最佳实践进行设定,以确保各自获得质量优良的焊缝。

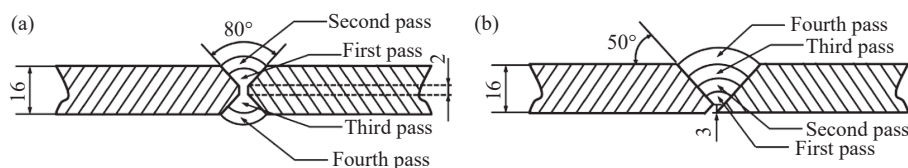
1.2 试验材料

试验用 Q390FRW 钢为钒微合金化耐火耐候钢,经 ZGJ0.05 型真空感应熔炼炉熔炼后,实测化学成分为 0.12C-1.25Mn-0.42Ni-0.28Si-0.08V(%),其中 C 含量为 0.12%,并通过添加 0.08% 的 V(钒)进行微合金化。钒的添加旨在通过析出强化和细化晶粒提升强度,其形成的稳定碳氮化物还能改善高温组织稳定性与耐蚀性。利用 Jmat-Pro 热力学软件计算了热力学平衡状态下的相演变规律和 TTT 曲线,用于指导加工和热处理过程工艺参数的优化制定。铸坯在箱式电阻炉中加热至 1 200 °C 保温 30 min 后,热轧至尺寸为 16 mm(T)×200 mm(W)的厚板,终轧温度为 880 °C。为明确钒微合金化的作用,同时制备了未添加钒的 Q390 钢作为对照材料,其化学成分为:0.12C-1.25Mn-0.42Ni-0.28Si(%),其余工艺条件(熔炼、热轧、焊接、热处理)与 Q390FRW 钢保持一致。通过对比两种材料在相同焊接与热处理制度下的性能差异,可直观评估钒的

微合金化效应。

将热轧板加工成焊接试板,为比较两种典型焊接工艺的效果,分别采用适用于中厚板对接的X型坡口进行FCAW和Y型坡口进行SAW,坡口尺寸及形式依据各自工艺标准设计(如图1所示)。焊接前统一预热至150℃。FCAW与SAW在热输入、焊材及熔池保护方式上存在固有差异,研究未强行统一这些参数,而是遵循各自工艺的最佳实践规范进行焊接,以确保获得各自工艺下的优质焊缝,具体焊接参数见表1。焊后试板分为四组平行试样:1、2组试样采用FCAW和SAW焊接工艺,未进行焊后热处理;3、4组试板采用FCAW和SAW焊接工

艺后进行了525℃保温60min的热处理,该温度依据TTT曲线中贝氏体转变鼻尖温度确定,旨在促进贝氏体相变并消除焊接应力,同时促进钒的碳化物进一步析出以稳定组织。基于贝氏体等温转变动力学与焊接应力消除的双重考虑设置保温时间为60min。根据TTT曲线(图2),525℃下贝氏体转变在30~90min内基本完成,60min可确保组织转变充分且避免碳化物过度长大。此外,参照《焊接热处理工艺规范》(GB/T 33831-2017)及类似厚度低合金钢的焊后热处理研究,该时间参数能有效消除焊接残余应力,并促进钒碳化物的弥散析出,符合工程实际应用要求。



(a)X型坡口—FCAW; (b)Y型坡口—SAW

图1 焊接坡口与焊缝示意(单位:mm)

Fig. 1 Schematic diagram of welding groove and weld seam

表1 焊接工艺参数

Table 1 Welding process parameters

Welding process	Groove type	Wire / Flux type	Welding current /A	Welding voltage /V	Welding speed/(cm·min ⁻¹)	Calculate heat input/(kJ·cm ⁻¹)
FCAW	X	YJ711(Q) Flux-cored wire	260~280	28~30	25~30	15~20
SAW	Y	WH H10Mn2 Solid wire+HJ431 Soldering flux	550~600	32~34	40~45	25~30

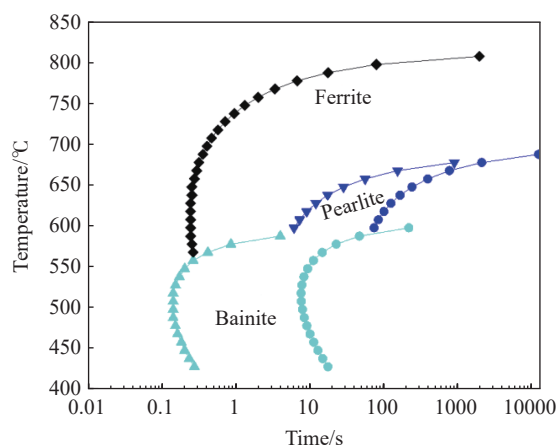


图2 Q390FRW钢TTT曲线

Fig. 2 TTT curve of Q390 FRW steel

通过线切割从试板中切取焊缝、热影响区和母材等区域的金相试样,经38~6.5μm(400~2000目)的砂纸打磨后,用2.5μm金刚石抛光膏抛光。抛光后的试样经4%的硝酸酒精腐蚀后,利用Axio Scop蔡司显微镜观察金相组织,关注含钒析出相的分布。在WAW-1000DE液压万能试验机上进行拉伸试验,

拉伸速率设定为2mm/min。利用FEI Quanta 250扫描电子显微镜表征拉伸试样的断口形貌。

2 试验结果及分析

2.1 Q390FRW钢热力学计算及组织性能

热轧态Q390FRW钢的力学性能如表2所示,符合GB/T 1591-2018《低合金高强度结构钢》要求。室温下组织为多边形铁素体与带状珠光体(Pearlite, P)双相组织,如图3所示。

表2 Q390FRW钢力学性能

Table 2 Mechanical properties of Q390FRW steel

Properties	Yield strength/MPa	Tensile strength/MPa	Elongation/%
Measured value	530	635	25
GB/T 1591-2018	≥380	490~650	≥21

图4为试验钒微合金化Q390FRW钢热力学平衡状态下的相演变图。由图可以看出,热力学平衡状态下,Q390FRW钢的 A_{c3} 为823.86℃, A_{c1} 为673.45℃,值得注意的是,VC的开始析出温度为

799.16 ℃, 这表明在热加工及冷却过程中, 钒能够以细小弥散的 VC 形式在奥氏体中早期析出, 有效钉扎晶界, 抑制晶粒长大。Fe₃C 的开始析出温度为 689.78 ℃。室温下的微观组织由 97.79% 铁素体、1.49% 渗碳体和 0.11% VC 析出相组成。Mn 和 Ni 元素的加入降低了奥氏体相变区间, 而 V 则通过 VC 的析出细化晶粒, 同时有助于提升钢的耐高温和耐腐蚀性能。

图 4 为 Q390FRW 钢的 TTT 曲线图。由图中可以看出试验钢的贝氏体等温相变温度区间为 425~575 ℃, 贝氏体开始相变的鼻尖温度为 525 ℃。对焊接后的试样进行热处理时, 选择 525 ℃ 保温 60 min, 在此制度下可以实现贝氏体相变的快速进

行, 同时有效消减焊接冷却过程引起的热应力和组织应力。

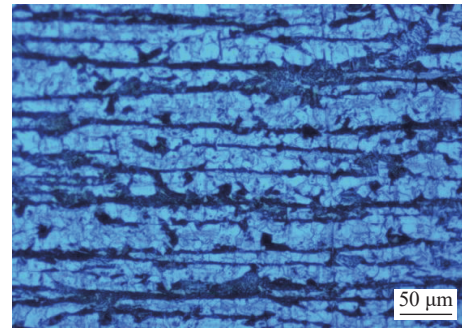


图 3 Q390FRW 钢热轧态母材的金相组织(F 与 P)
Fig. 3 Microstructure of as-rolled Q390FRW steel base metal (F and P)

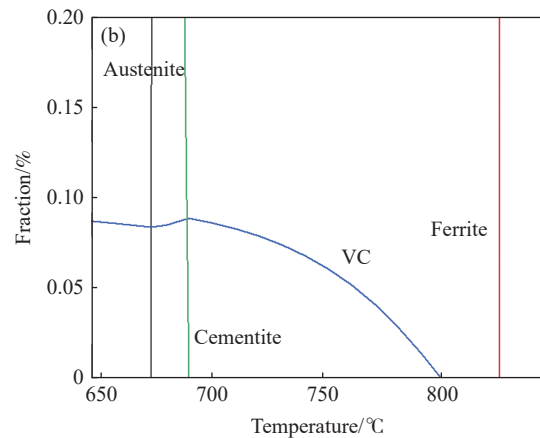
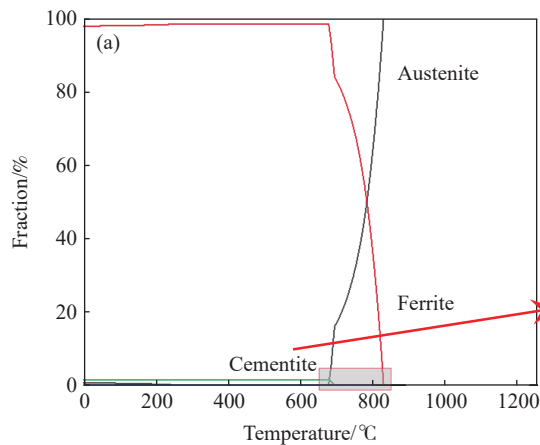


图 4 Q390FRW 钢相演变
Fig. 4 Phase transition of Q390FRW steel

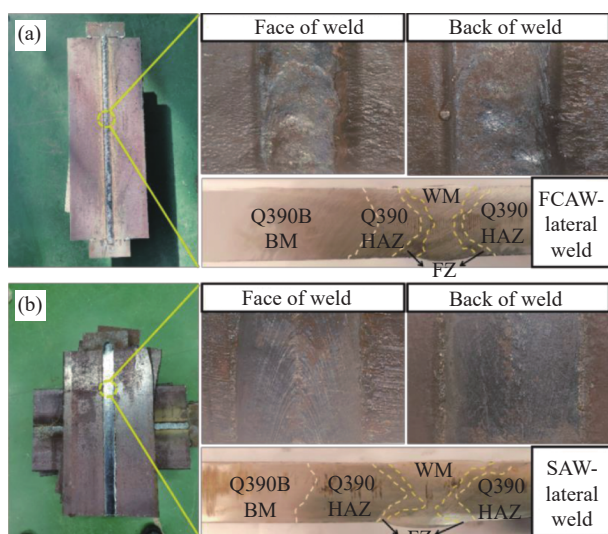
2.2 FCAW 和 SAW 焊缝宏观形貌

图 5 为 FCAW 和 SAW 的焊缝宏观形貌, 均无裂纹和孔洞存在。由于 SAW 焊接过程中采用了更高的焊接电流和较慢的焊接速度, 焊缝区域的热输入量显著增加, 导致 SAW 焊缝金属比 FCAW 更宽, 且焊接鱼鳞纹更为密集。从焊缝的侧面图可以看出, 两组试样的焊缝上下部分均匀, 焊缝余高几乎与表面平齐, 有效降低了应力集中^[11]。同时, 焊缝侧面图显示, 两种焊接接头均由焊缝金属 (Weld Metal, WM)、熔合区 (Fusion Zone, FZ)、热影响区 (Heat Affected Zone, HAZ) 和母材 (Base Metal, BM) 四部分组成。

2.3 FCAW 和 SAW 焊接接头组织

FCAW 与 SAW 焊接接头的组织形貌 (图 6、7) 差异显著, 主要源于两者在热输入、冷却速率及冶金行为上的固有区别。如表 1 所示, SAW 工艺采用了显著更高的热输入, 导致其焊缝熔池存在时间更长、冷却速率相对较慢, 从而深刻影响了相变过程

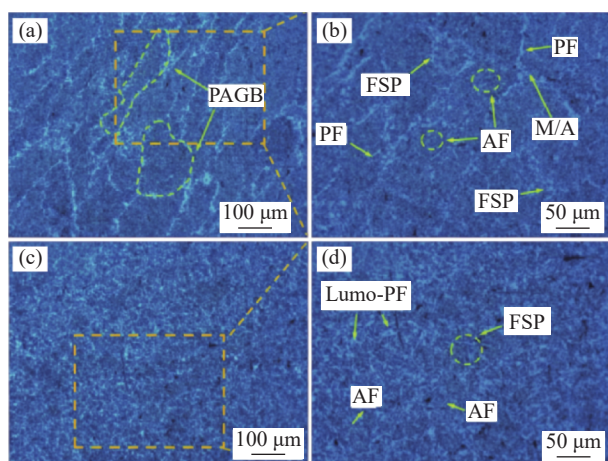
与最终组织。以下将分别对两种接头的组织进行详细分析。图 6 为 Q390FRW 钢 FCAW 焊接区的金相组织, 主要由 AF、PF、FSP 和少量 M-A 岛组成。焊接过程中, 焊丝在高温下熔化形成熔池, 液态金属附着于基体金属表面, 并在温差作用下快速结晶。焊缝中心的高温 and 快速散热促使晶粒沿焊缝中心方向生长, 形成柱状晶。当焊缝温度降至 A_{c1} 以下时, 奥氏体晶界 (Prior Austenite Grain Boundary, PAGB) 首先析出 PF, 呈现板条状和块状分布^[12]。在 500 ~ 450 ℃ 的温度区间, 板条状 PF 快速生长, 碳的扩散速度较慢。冷却至室温时, 部分富碳奥氏体区转变为马氏体, 部分过冷奥氏体保留至室温, 形成 M-A 岛^[13]。图 6(c)(d) 为熔合区的金相组织, 主要由块状 PF、AF 和少量 FSP 组成。焊接前, 基材和焊丝经过预热处理, 焊接过程中的热能扩散更加均匀。虽然熔化过程复杂, 但焊丝成分与母材匹配, 局部熔融态的化学成分保持均匀。熔合区的组织细小且均匀, 由于熔合区的热输入量较低, 冷却速度较快, 导致 PF 主要呈块状分布。



(a)FCAW; (b)SAW

图5 焊接接头宏观形貌

Fig. 5 Macroscopic morphology of welded joints



(a) 焊缝中心; (b) 图 (a) 局部放大; (c) 熔合线附近区域;

(d) 图 (c) 局部放大

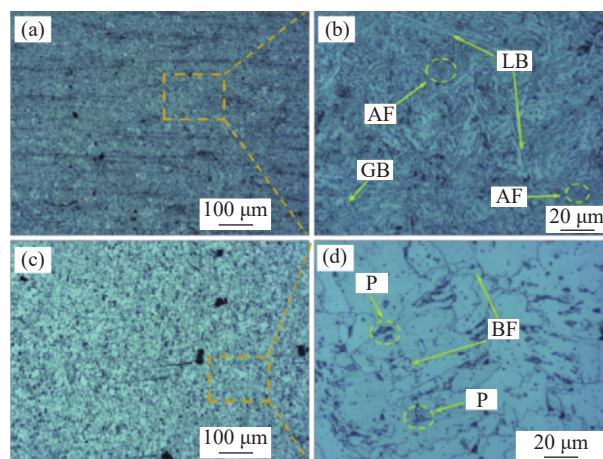
图6 FCAW 焊接接头显微组织

Fig. 6 Microstructure of FCAW welded joints

经 SAW 工艺焊接后,焊接区的微观组织形貌与 FCAW 显著不同。如表 1 所示,SAW 采用了更高的焊接热输入(约 28 kJ/cm),这导致其熔池高温停留时间延长,且整体冷却速率实际上相对较慢(与 FCAW 相比)。这种热循环特点影响了焊缝金属的固态相变过程。由图 7(a)(b)可以看出,SAW 焊缝的主要组织为贝氏体(Bainite, B)、AF 和多边形铁素体。较高的热输入和较慢的冷却速率有利于中温转变产物贝氏体的形成^[14]。由图 7(c)(d)可以看出,两种焊接工艺下熔合区的晶粒尺寸均匀。

由于 SAW 焊缝熔合区接受了更高的热输入,其平均晶粒尺寸略大于 FCAW 焊缝熔合区。焊材的差异及其与基体结合过程中的冶金反应促使熔合区在降温过程中形成贝氏铁素体(BF),并在 BF 细

晶之间析出珠光体和碳化物(Fe_3C)^[15]。因此,SAW 熔合区的组织主要由 BF、P 和多边形铁素体组成。



(a) 焊缝中心区域; (b) 图 (a) 局部放大; (c) 熔合线附近区域;

(d) 图 (c) 局部放大

图7 SAW 焊接接头显微组织

Fig. 7 Microstructure of SAW welded joints

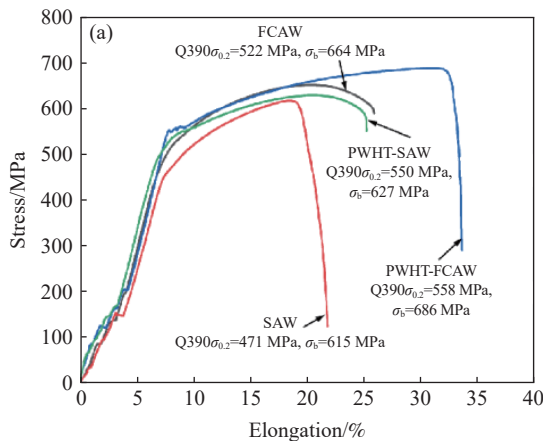
2.4 焊后热处理对焊接接头组织的影响

图 8 为热处理后焊接接头的显微组织。根据图 8(a)可以看出, FCAW 焊缝区域的主要组织仍以 AF、PF 和 FSP 为主。热处理过程中,板条状 PF 的比例增加,块状 PF 明显减少; M-A 岛发生分解,转化为晶界铁素体(Grain Boundary Ferrite, GB)^[16]; FSP 的含量显著增加。由图 8(b)可以看出,由于热处理温度未达到奥氏体化温度,促进了熔合区中细珠光体和渗碳体的析出。由于热处理时间较长,GB 的比例显著高于板条贝氏体(Lath Bainite, LB);热处理后焊缝区域的 AF 分布更加均匀,平均晶粒尺寸显著减小。图 6(c)进一步分析表明,热处理后 SAW 焊缝区域 GB 和 AF 的含量显著提高,而 LB 的比例明显降低。这种变化主要是由于在 500 ~ 600 °C 的热处理过程中,位于奥氏体晶界或晶内亚晶界的 LB 发生形核,转变为大量针状组织(AF),具有较小的长宽比和不规则的形态,并含有较高的位错密度^[17]。比较图 8(d)与图 7(d),可以观察到 SAW 熔合区焊缝的形貌变化不大,但晶粒细化程度显著提升,同时促进了晶界间细珠光体和碳化物的析出。这一变化在很大程度上增强了熔合区的强度和塑性,避免了熔合区成为焊缝金属的潜在薄弱点。

2.5 力学性能及断口分析

图 9 为各焊接接头的拉伸性能。应力-应变曲线无明显屈服平台,故采用 $\sigma_{0.2}$ 作为屈服强度。如图 9(b)所示,未热处理时, FCAW 接头的强度与塑性均优于 SAW 接头,其抗拉强度(664 MPa)和伸长率(25.94%)均超过母材。经 525 °C-60 min 热处理

后,两种接头的性能均得到提升,其中 FCAW 接头的强化效果尤为显著,其抗拉强度与伸长率分别达到 686 MPa 和 33.64%,塑性较热处理前提升了 29.7%。FCAW 焊缝中的 M-A 岛分布于板条状先共析铁素体之间,其高碳马氏体与残余奥氏体共存结构在受力时易产生应力集中,促进裂纹的萌生与扩展^[12]。热处理不仅促进了钒碳化物等碳化物的弥散析出,还使 PF 和 FSP 向 B 转变,从而协同提升其强塑性。对于 SAW 接头,热处理使 AF 组织更均匀并向 GB 转化,同时钒碳化物的析出对位错产生钉扎作用,共同改善了焊缝的强韧性。研究获得的性能显著优于未添加钒的同类钢接头。如张等人^[7]报道的 Q390E 钢 SAW 接头抗拉强度与伸长率最高仅为 596 MPa 和 26.5%。而钒微合金化 Q390FRW 钢经 FCAW 及热处理后,接头性能分别为 679 MPa 和 33.64%(图 9(b))。这直接证实了钒微合金化结合焊后热处理对实现接头强韧化协同提升的关键作用。



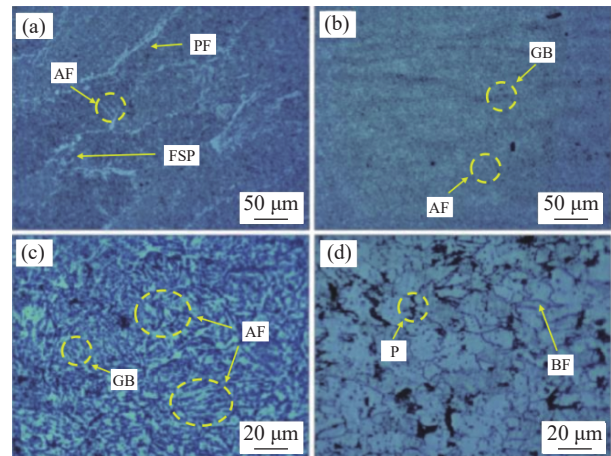
(a) 工程应力-应变曲线; (b) 抗拉强度和伸长率

图 9 Q390 焊接接头的拉伸性能

Fig. 9 Tensile properties of Q390 welded joints

为进一步验证钒微合金化的作用,图 10 对比了未加钒 Q390 钢与钒微合金化 Q390FRW 钢在 FCAW+热处理状态下的工程应力-应变曲线。如图所示,未加钒接头的抗拉强度为 555 MPa,伸长率为 26.5%,而钒微合金化接头的抗拉强度与伸长率分别为 686 MPa 与 33.64%。钒的添加显著提升了接头的强度与塑性,尤其是伸长率提升约 27%,这主要归因于钒碳化物的析出强化与组织细化作用。

图 11 为 FCAW、SAW 焊接试样及热处理后试样拉伸断裂后的断口形貌。FCAW 断口表现出明显的河流花样,断裂面包含大量均匀分布的浅层韧窝。部分区域可见沿晶断裂形成的坑洞,裂纹路径中存在明显的点状 M/A 岛。表明在拉伸过程中, PAGB 中

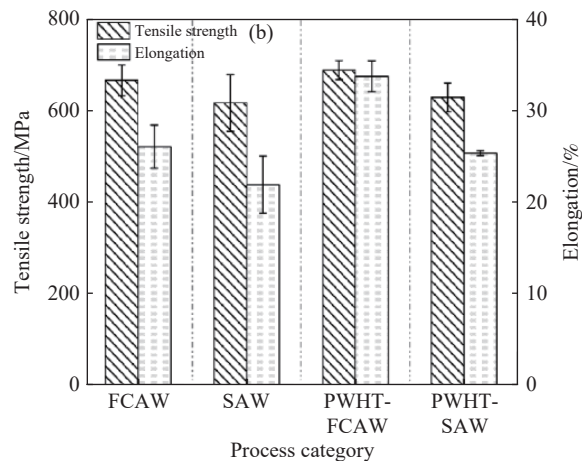


(a) FCAW 焊缝中心; (b) FCAW 熔合区; (c) SAW 焊缝中心;

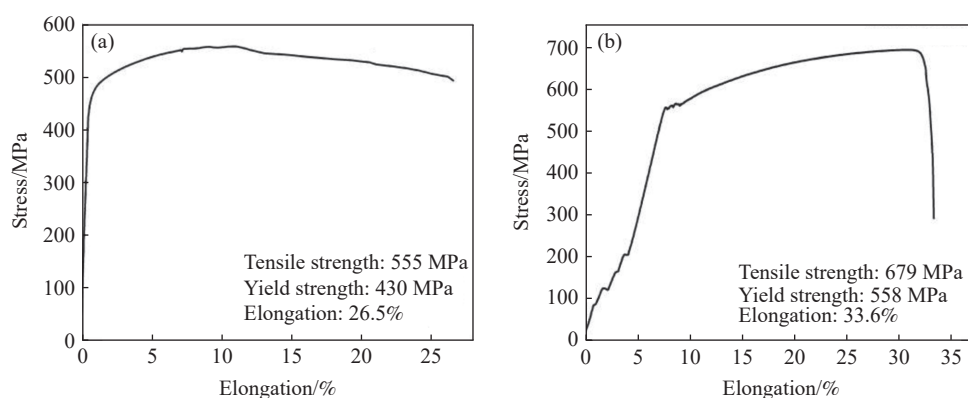
(d) SAW 熔合区

图 8 焊后热处理(525 °C×60 min)焊接接头显微组织

Fig. 8 Microstructure of the welded joints after post-weld heat treatment (525 °C×60 min)



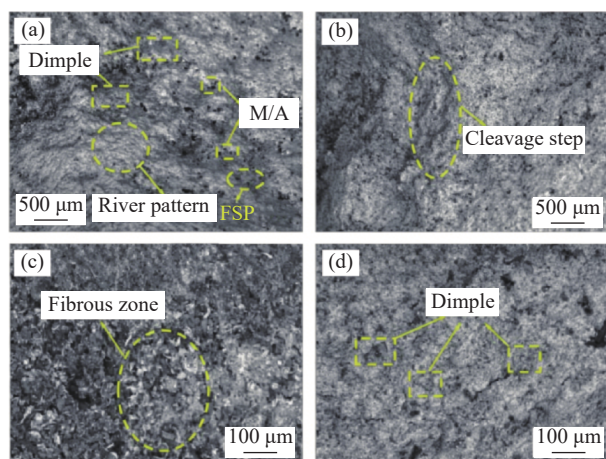
的 M/A 岛促进了微裂纹的扩展,导致沿晶断裂的发生^[18]。尽管 FSP 对裂纹扩展有一定阻碍作用,但其影响相对较小。因此, FCAW 焊接接头的断裂特征为韧性复合断裂。SAW 断口同样表现出解理断裂的微观特征,但整体大型韧窝较少,断裂面主要由均匀分布的微型韧窝组成。表明 SAW 焊接接头的断裂同样属于韧性复合断裂,且脆性特征更为显著。热处理后的 FCAW 断口呈现出纤维区和剪切唇区两个典型区域,表现出韧性断裂特征。因此,热处理后的 FCAW 焊接接头以韧性断裂为主。热处理后的 SAW 断裂区中,解理台阶消失,主要呈现出均匀分布的大型与微型韧窝。热处理过程改变了焊缝区域的微观组织构成,消减了焊接热应力,显著提高了 SAW 焊接接头的塑性。



(a) 未加钒 Q390 钢; (b) 钒微合金化 Q390FRW 钢

图 10 未加钒 Q390 钢与钒微合金化 Q390FRW 钢(FCAW+热处理)接头的工程应力-应变曲线对比

Fig. 10 Comparison of engineering stress-strain curves of joints of vanadium-free Q390 steel and vanadium microalloyed Q390FRW steel (FCAW + heat treatment)



(a)FCAW; (b)SAW; (c) 热处理 FCAW; (d) 热处理 SAW

图 11 断口形貌

Fig. 11 Tensile fracture

3 结论

1) 热力学平衡状态下, Q390FRW 钢的 A_{c3} 为 823.86 °C, A_{c1} 为 673.45 °C。室温下的微观组织由 97.79% 铁素体、1.49% 渗碳体和 0.11% VC 析出相组成。钒的添加为通过析出强化和晶粒细化提升性

能奠定了基础。贝氏体等温相变温度区间为 425~575 °C, 贝氏体开始相变的鼻尖温度为 525 °C。

2) FCAW 焊缝由 AF、PF、FSP 和少量 MA 岛组成, SAW 焊缝以 B、AF 和多边形铁素体为主, 两者均表现为韧脆复合断裂。FCAW 焊接后的力学性能高于 SAW, 抗拉强度和伸长率分别为 664 MPa 和 25.94%, 达到 Q390FRW 热轧板材的 104.57% 和 103.8%。

3) 得益于钒微合金化的设计, 525 °C-60 min 热处理后, FCAW 焊缝中 M-A 岛分解为 GB, PF 和 FSP 向 B 转变, 晶粒细化, 伸长率提升至 33.64%, 与未热处理前相比, 提高了 29.7%。热处理过程同时促进了钒的碳化物的弥散析出, 产生了显著的析出强化效果, 使得 FCAW 接头的伸长率大幅提升至 33.64%, 断口呈现明显的韧性断裂特征。

4) 与未加钒的 Q390 钢相比, 钒微合金化 Q390FRW 钢经相同焊接与热处理后, 接头伸长率提升约 27%, 抗拉强度提升约 11%, 进一步证实了钒通过析出强化与组织细化对焊接接头强韧化的积极作用。

参考文献

- [1] LU C F, LIU X G. Review on global development of weathering steel bridges[J]. Steel Construction (Chinese & English), 2024, 39(10): 21-31.
(卢春房, 刘晓光. 国内外耐候钢桥发展综述[J]. 钢结构 (中英文), 2024, 39(10): 21-31.)
- [2] HUANG F Y, GUI K, YI Z H, *et al.* Study on interaction between integral abutment, H-shaped steel pile and soil under quasi-static test based on temperature deformation effect[J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(3): 109-118.
(黄福云, 桂奎, 易志宏, 等. 基于温度变形效应的整体式桥台-H 型钢桩-土相互作用拟静力试验研究[J]. 铁道学报, 2023, 45(3): 109-118.)
- [3] EDITORIAL DEPARTMENT OF CHINA JOURNAL OF HIGHWAY AND TRANSPORT. Review on China's bridge engineering research: 2024[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(12): 1-160.

- (《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2024[J]. 中国公路学报, 2024, 37(12): 1-160.)
- [4] MA Y, PENG A, WANG L, *et al.* Fatigue performance of an innovative shallow-buried modular bridge expansion joint[J]. *Engineering Structures*, 2020, 221.
- [5] LI B, WANG Z B, LAN L Y, *et al.* Relationship between thickness, temperature field and microstructure evolution of Q390 steel plate under TMCP process[J]. *Hot Working Technology*, 2024, 53(15): 126-130.
(礼宾, 王泽彬, 兰亮云, 等. TMCP 工艺下 Q390 钢板厚度、温度场与组织演变的关系[J]. 热加工工艺, 2024, 53(15): 126-130.)
- [6] YU H, YANG L, PAN H B, *et al.* Microstructure evolution mechanism of δ -TRIP steel during isothermal process and its mechanical properties[J]. *Iron and Steel*, 2024, 59(11): 173-182.
(余浩, 杨璐, 潘红波, 等. δ -TRIP 钢等温退火组织演变机制及力学性能[J]. 钢铁, 2024, 59(11): 173-182.)
- [7] ZHANG Y J, MA C Y, PENG Y, *et al.* Microstructure and properties of welded joint of Q390E steel by SAW[J]. *Hot Working Technology*, 2013, 42(15): 161-163.
(张元杰, 马成勇, 彭云, 等. Q390E 钢埋弧焊焊接接头组织与性能[J]. 热加工工艺, 2013, 42(15): 161-163.)
- [8] WU R P, WU J W, WANG T X, *et al.* Study on the welding tests of Q390R steel plate[J]. *Pressure Vessel Technology*, 2023, 40(8): 12-21.
(吴瑞萍, 武靖伟, 王天先, 等. Q390R 钢板的焊接试验研究[J]. 压力容器, 2023, 40(8): 12-21.)
- [9] LIU Z S, QIAO L X, CAO R, *et al.* A comparative study on microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of M390 and 304 with different welding methods[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2023, 33 (16): 8242-8254.
- [10] XIE J L, MA Y C, WANG M, *et al.* Interfacial characteristics and residual welding stress distribution of K4750 and Hastelloy X dissimilar superalloys joints[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 67 253-261.
- [11] MA J P, CAO R, ZHOU X. Development on improving fatigue life of high strength steel welded joints[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2024, 45(10): 115-128.
(马景平, 曹睿, 周鑫. 高强度焊接接头疲劳寿命的提高方法进展[J]. 焊接学报, 2024, 45(10): 115-128.)
- [12] FENG W, YU T X, CHEN B, *et al.* Effect of Cr content on the microstructure evolution in weld metal for 1000 MPa grade high strength steel[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2024, 45(9): 76-83.
(冯伟, 于庭祥, 陈波, 等. Cr 含量对 1000 MPa 级高强度钢熔敷金属组织演变的作用机制[J]. 焊接学报, 2024, 45(9): 76-83.)
- [13] PENG N Q, ZHOU W H, JIN D H, *et al.* Uniaxial tensile and low cycle fatigue properties of high strength and toughness bridge steel Q690q[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2024, 49(2): 25-31.
(彭宁琦, 周文浩, 金东浩, 等. 高强韧桥梁钢 Q690q 的单轴拉伸性能与低周疲劳性能[J]. 金属热处理, 2024, 49(2): 25-31.)
- [14] LI L Z, XIE C S, DAI X, *et al.* Research progress of new generation candidate material SA508Gr. 4N steel for nuclear pressure vessel[J]. *Hot Working Technology*, 2025, 54(4): 1-10,15.
(李林泽, 谢常胜, 代鑫, 等. 新一代核压力容器候选材料 SA508Gr. 4N 钢的研究进展[J]. 热加工工艺, 2025, 54(4): 1-10,15.)
- [15] HE T Y, YU S F, ZHOU J, *et al.* Research on microstructure evolution of high-strength steel components in multi-arc additive manufacturing[J/OL]. *Journal of Mechanical Engineering*, 1-12[2025-03-17].
(何天英, 余圣甫, 周杰, 等. 多电弧增材制造高强度钢组织转变规律研究[J/OL]. 机械工程学报, 1-12[2025-03-17].)
- [16] SHANG C J, HU L J, YANG S W, *et al.* Forming and controlling of the acicular ferrite in low carbon microalloyed steel[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2005(5): 471-476.
(尚成嘉, 胡良均, 杨善武, 等. 低碳微合金钢中针状铁素体的形成与控制[J]. 金属学报, 2005(5): 471-476.)
- [17] XIAO Y F, LIU Y Z, SUN Y H, *et al.* The influence of hydrogen pre-charging on the stress corrosion susceptibility of SCR welded joints[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2024, 45(10): 19-27.
(肖友福, 刘永贞, 孙有辉, 等. 预充氢对 SCR 焊接接头应力腐蚀敏感性影响[J]. 焊接学报, 2024, 45(10): 19-27.)
- [18] ZHOU L, ZHANG R X, YANG H F, *et al.* Microstructure and mechanical properties of friction stir welded Q235 low-carbon steel[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2018, 27(12): 6709-6718.