

· 应用与服役 ·



焊接工艺对 FH420 钢疲劳性能的影响

刘观猷¹, 葛 亮¹, 李 良², 韩永典²

(1 江阴兴澄特种钢铁有限公司, 江阴 214429; 2 天津大学材料科学与工程学院, 天津 300350)

摘 要: 试验用 80 mm 厚 FH420 钢经过二氧化碳气体保护焊(热输入 7 kJ/cm)和单(热输入 24 kJ/cm)、双埋弧焊(热输入 38 kJ/cm)焊接, 形成三种焊接接头, 对其 1/4 厚度处的母材、热影响区和焊缝进行微观形貌观察和硬度测试, 并进行不同应力水平下的高周疲劳试验。结果表明, 随着热输入的增加, 细晶热影响区的珠光体和铁素体尺寸增加, 粗晶热影响区的粒状贝氏体含量降低、铁素体含量增加, 焊缝区的针状铁素体含量减少、先共析铁素体含量增加, 疲劳结果和断口分析表明, 三种钢的疲劳性能与焊接热输入引起的组织演变相关性不明显, 由于失效位置绝大部分位于母材, 三种接头的疲劳 S-N 曲线接近, 较低应力下二氧化碳气体保护焊的未熔合缺陷可能成为疲劳裂纹萌生点, 造成接头疲劳性能下降。

关键词: FH420 钢; 高周疲劳; 焊接接头; 微观组织; 断口分析

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. N250509 **中图分类号:** TG457. 11

Effect of Welding Process on Fatigue Property of FH420 Steel

Liu Guanyou¹, Ge Liang¹, Li Liang², Han Yongdian²

(1 Jiangyin Xingcheng Special Steel Works Co., Ltd., Jiangyin 214429, China;

2 School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: The 80 mm-thick FH420 steel used in test was welded by carbon dioxide gas shielded welding (heat input : 7 kJ / cm), single (heat input : 24 kJ / cm) and double submerged arc welding (heat input : 38 kJ / cm) to form three kinds of welded joints. The microstructure morphology observation and hardness test of the base metal, heat affected zone and weld seam at 1 / 4 thickness were carried out, and the high cycle fatigue test under different stress levels was carried out. The results show that with the increase of heat input, the size of pearlite and ferrite in the fine-grained heat-affected zone increases, the content of granular bainite in the coarse-grained heat-affected zone decreases and the content of ferrite increases, the content of acicular ferrite in the weld zone decreases and the content of proeutectoid ferrite increases. The fatigue results and fracture analysis show that the fatigue properties of the three steels are not significantly correlated with the microstructure evolution caused by welding heat input. Since the failure position is mostly located in the base metal, the fatigue S-N curves of the three joints are close. The incomplete fusion defect of carbon dioxide gas shielded welding under lower stress may become the fatigue crack initiation point, resulting in a decrease in the fatigue performance of the joints.

Key Words: FH420 Steel; High Cycle Fatigue; Welded Joints; Microstructure; Fracture Analysis

由于陆地化石能源的日益枯竭, 海洋石油和海上风电等海上能源越来越被人们重视起来。开发新一代轻量化、高承载能力、可靠性优异的海洋工程装备对高效开发海洋能源有着关键意义^[1]。而在海洋工程装备整体服役期间, 其始终承受风浪载荷、水流作用和机械振动, 导致海洋工程结构有潜在的疲劳失效风险^[2-3]。420 MPa 海洋工程用钢因其高强度、经济性及良好的低温韧性被逐步应用于海洋平台和海上风电导管架结构^[4-5], 在海洋装备制造过程中, 为提高焊接效率同时满足不同板厚、不同

精度要求和焊接变形要求, 常常需要不同焊接工艺对海工钢进行焊接, 埋弧焊与气保焊作为海洋工程领域常用的焊接工艺, 其热输入和工艺特性存在显著差异, 直接决定了焊接接头的微观组织和缺陷分布, 进而影响焊接接头的疲劳性能。因此, 研究不同焊接工艺对 420 MPa 高强钢的疲劳性能对于优化焊接工艺、提升结构的服役寿命具有重要意义。

钢结构的疲劳失效一般发生在焊接接头处, Trishita 等^[6]研究了 DP 钢激光焊焊接接头的疲劳性能, 结果表明, 焊缝尺寸影响了接头的疲劳寿命, 相

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFB3709903, 2023YFB3709904)

作者简介: 刘观猷(1985—), 男, 高级工程师; **E-mail:** cliuguanyou@citicsteel.com; **收稿日期:** 2025-07-29

通信作者: 韩永典(1983—), 男, 博士生导师, 教授; **E-mail:** hanyongdian@tju.edu.cn

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

比之下焊缝的微观结构对疲劳性能影响较小。同时,焊缝处的应力集中程度也是影响接头疲劳性能的影响因素之一,王祖华等^[7]研究了气体保护焊、埋弧焊和焊条手工焊对接头疲劳性能的影响,结果显示,焊条手工焊的接头应力集中程度最小,疲劳起裂寿命最高。王池权等^[8]研究了 5A06-O/7A05-T6 异种铝合金 TIG 焊对接接头的疲劳失效机理,结果表明,直径较大(≥ 0.5 mm)且富集于表面的气孔、未焊透夹杂物等焊接缺陷会严重降低接头的疲劳性能。焊接接头的组织不均匀性也是制约疲劳性能的因素之一,李东等^[9]研究了表面喷丸处理 SS400 钢对接接头的疲劳强度,结果表明,喷丸处理在接头表面形成了尺寸均匀细小的纳米级晶粒,显著提高了焊接接头的疲劳性能。此外,受焊接热循环影响,由于峰值温度和冷却速度的不同,焊接热影响区可能出现尺寸不同的组织,热影响区粗化的晶粒可能降低疲劳寿命^[10]。

采用显微组织观察、硬度测试、疲劳试验及断口形貌观察研究不同焊接工艺对 FH420 钢组织与力学性能的影响,对于制定合理的焊接工艺方案及确保低合金高强钢焊接接头的安全服役具有重要指导意义。

1 试验材料及方法

试验用 FH420 钢的化学成分见表 1,钢板厚度为 80 mm。分别采用二氧化碳气体保护焊、单丝埋弧焊和双丝埋弧焊进行焊接接头制备。二氧化碳气体保护焊是一种以保护性气体包裹电弧与熔池的熔化极焊接方法,具有热输入低、经济性高和适应性强的特点;单丝埋弧焊通过一根焊丝与熔渣覆盖的电弧进行高效焊接,广泛应用于中厚板结构;双丝埋弧焊在此基础上引入两根焊丝同步焊接,可显著提升焊接效率与热输入,适用于大厚度钢板的快速焊接。三种工艺热输入差异显著,具有代表

性,能够有效对比焊接工艺和热输入对接头微观组织与疲劳性能的影响。气体保护焊的焊接热输入约为 7 kJ/cm,采用单丝埋弧焊的热输入约为 24 kJ/cm,双丝埋弧焊的热输入约为 38 kJ/cm。焊接的坡口形式均为 K 型坡口,具体焊接参数见表 2。以距离板材表面 20 mm 处为中心切取疲劳试样,使试样标距段包含母材、热影响区和焊缝,具体取样位置及试样尺寸如图 1 所示。每个试样表面经过砂纸打磨至 5000 目后进行机械抛光处理以消除表面粗糙度的影响。采用 SDS-100 电液伺服疲劳试验机对加工试样进行疲劳测试,试样的取样位置和尺寸如图 1 所示,每种焊接接头取 15 个试样,分为五个应力水平,每个应力水平测试 3 个试样,应力比为 0.1,频率为 20 Hz,考虑到试验成本和国际焊接学会的推荐,规定如试样超过 2×10^6 次循环仍不发生疲劳失效,则停止试验,疲劳断口采用 Sigma 300 蔡司热场扫描电镜进行观察(SEM)。

使用线切割在 1/4 厚度处取三种焊接接头的金相试样,经过打磨和机械抛光后采用 5% 硝酸酒精溶液进行刻蚀,随后采用 OLYMPUS-GX51 光学显微镜(OM)进行观察,之后对三种焊接接头试样进行维氏硬度测量,试验力为 10 kg,保载时间为 10 s,每个点间隔 0.5 mm。

表 1 FH420 钢的化学成分(质量分数)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Ti	Nb
0.063	0.096	1.47	0.013	0.0014	0.21	0.32	0.036	0.016	0.018

2 试验结果与分析

FH420 钢 1/4 处的母材和三种工艺下的焊接接头微观组织形貌如图 2-5 所示。图 2(a)所示的试样母材为典型的铁素体和珠光体组织,如图 2(b)所示,扫描电镜下少量较白亮的珠光体分布于块状的

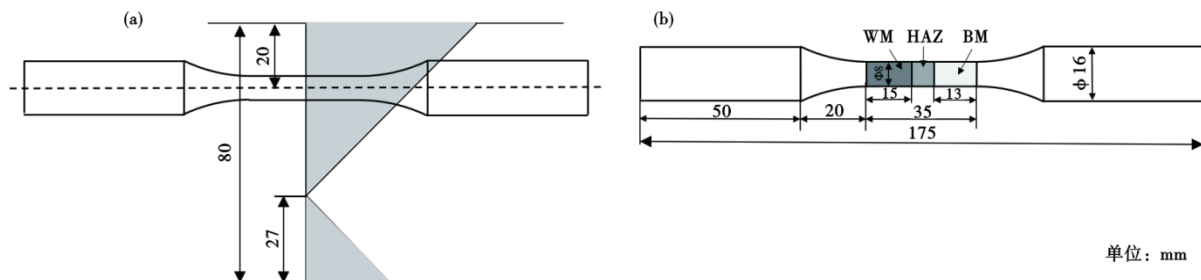


图 1 FH420 钢疲劳试样:(a)取样位置,(b)试样尺寸

Fig. 1 Fatigue specimens of FH420 steel : (a) Sampling location, (b) Specimen dimensions

表2 FH420钢三种工艺的焊接参数
Table 2 Welding parameters of FH420 steel in three processes

焊接工艺	电流/A	电压/V	焊接速度/(mm·min ⁻¹)	预热温度/℃	热输入/(kJ·cm ⁻¹)
气体保护焊	210~220	23~24	230~240	130±5	6~8
单丝埋弧焊	570~630	30~34	400~450	195~205	22~26
双丝埋弧焊	前丝 640~670	29~31	640~650	160~210	36~40
	后丝 580~620	32~35			

铁素体边界,珠光体因具有较高的硬度保证了母材的强度,同时提升疲劳裂纹萌生门槛值,较软的铁素体为F420钢提供了较高的塑性。图3为三种接头的细晶热影响区,当热输入较小时,细晶区的铁素体块和珠光体块呈现细小且均匀的形态,随着热输入的增加,铁素体和珠光体的尺寸均增大。在焊接热循环的作用下,粗晶热影响区的微观组织演变与焊接热输入呈现更加显著的相关性:当热输入约为7 kJ/cm时粗晶区形貌如图4(a)所示,粗晶区经历了较快的冷却速率,形成了尺寸较小的粒状贝氏体组织,如图4(b)所示,当热输入升高时,贝氏体转变区停留时间延长,粒状贝氏体组织尺寸增大,并形成了少量的铁素体组织;当热输入进一步增大至38 kJ/cm时,冷却速率显著降低,过冷奥氏体过冷度减小,形成粗大的先共析铁素体晶粒,珠光体倾向于沿先析铁素体晶界生长,呈现网状分布特征,形貌如图4(c)所示,总体的微观组织为少量粒状贝氏体、先共析铁素体和网状珠光体。

如图5所示,焊缝的组织演变与热输入同样有着显著关联,随着热输入的升高,组织由细小弥散的针状铁素体转变为少量网状先共析铁素体和针状铁素体,当热输入进一步增高时,晶界处先共析铁素体因碳扩散充分而大量粗化并连接成网状,占

据晶界主要区域,最终组织演变为针状铁素体和大量网状先共析铁素体。

图6所示为三种不同焊接工艺接头沿熔合线纵向截面的硬度分布曲线。母材的硬度值在170~175HV₁₀之间,为三种焊接接头的硬度最低点,在没有热点应力的情况下,较软的区域抵抗裂纹萌生能力较低,容易成为疲劳裂纹萌生的潜在位点,从而引发疲劳失效。气保焊焊接接头呈现出明显的硬度梯度特征,粗晶热影响区的硬度最高,达到220HV₁₀,为三种接头的最高值。相比之下,使用单丝埋弧焊和双丝埋弧焊的焊接接头硬度分布相对均匀,焊缝的硬度值最高,说明埋弧焊显著抑制了热影响区硬度异常升高,这与图4所示的粗晶区组织演变规律一致,随着热输入的增加,粗晶区较软的先共析铁素体含量增加,粗晶区的硬度得到有效降低。

利用最小二乘法对三种焊接接头的疲劳数据进行拟合,得到的三条疲劳S-N曲线如图7所示,拟合得到的气保焊、单丝埋弧焊、双丝埋弧焊焊接接头在200万次循环的疲劳极限分别为384、387、391 MPa,可见三种焊接接头的疲劳极限相近,此外,在高、低应力水平下焊接接头的疲劳寿命差异同样不显著,表3展示了疲劳试验中每个试样的断裂位置,可见两种埋弧焊焊接接头疲劳试样在不同

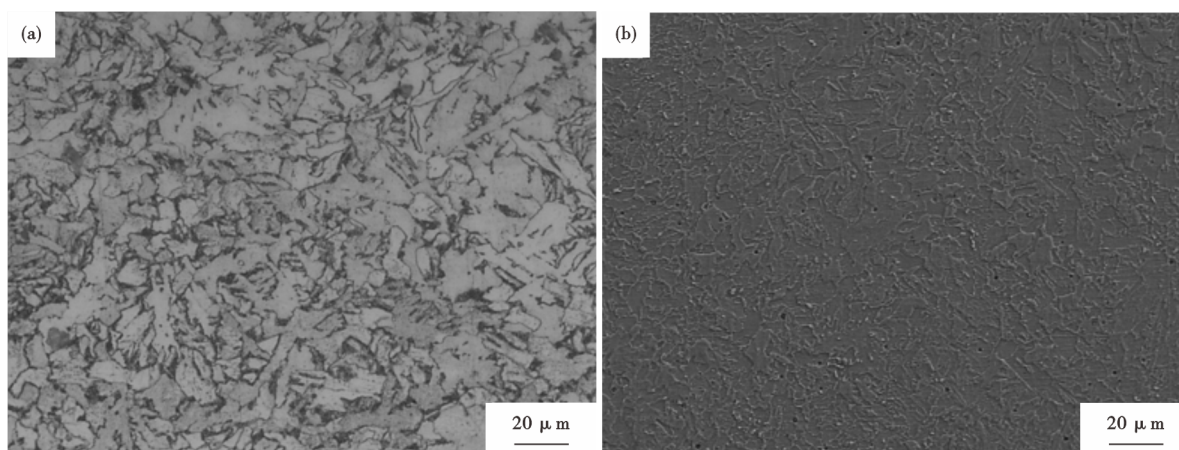


图2 FH420钢母材的微观组织形貌:(a)OM,(b)SEM

Fig. 2 Microstructure morphology of FH420 steel base metal : (a) OM, (b) SEM

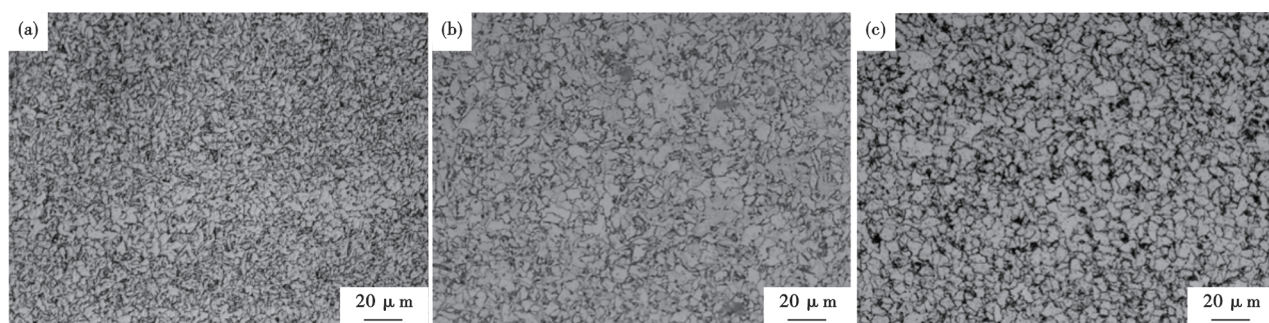


图3 FH420钢三种焊接接头细晶热影响区的微观组织形貌:(a)二氧化碳气体保护焊,(b)单丝埋弧焊,(c)双丝埋弧焊

Fig. 3 Microstructure morphology of fine grain heat affected zone of three kinds of welded joints of FH420 steel : (a) carbon dioxide gas shielded welding, (b) single wire submerged arc welding, (c) twin-wire submerged arc welding

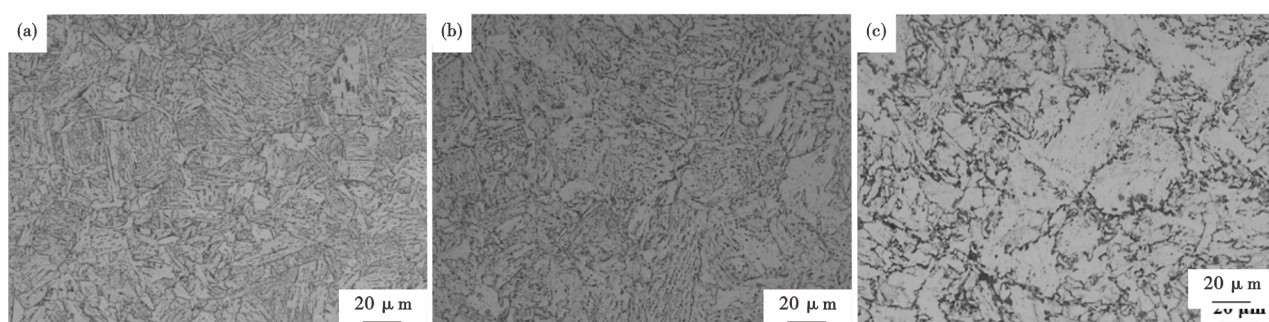


图4 FH420钢三种焊接接头粗晶热影响区的微观组织形貌:(a)二氧化碳气体保护焊,(b)单丝埋弧焊,(c)双丝埋弧焊

Fig. 4 Microstructure morphology of coarse grain heat affected zone of three kinds of welded joints of FH420 steel : (a) carbon dioxide gas shielded welding, (b) single wire submerged arc welding, (c) twin-wire submerged arc welding

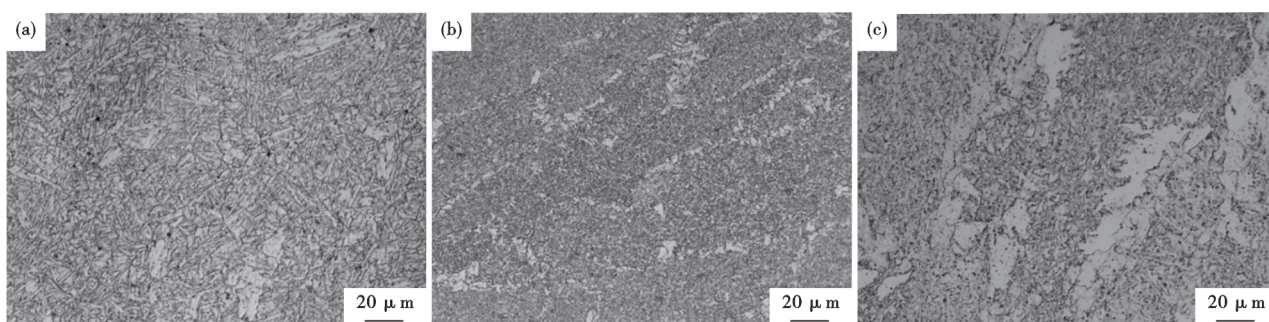


图5 FH420钢三种焊接接头焊缝的微观组织形貌:(a)二氧化碳气体保护焊,(b)单丝埋弧焊,(c)双丝埋弧焊

Fig. 5 Microstructure of three kinds of welded joints of FH420 steel : (a) carbon dioxide gas shielded welding, (b) single wire submerged arc welding, (c) twin-wire submerged arc welding

应力水平下疲劳失效均发生在较软的母材处,这与白云等^[11]、吕光宙等^[12]的研究结论一致。气体保护焊焊接接头试样也仅在 380 MPa 下有试样断裂在焊缝,断裂在母材的疲劳试样在三种接头中展现了相似的疲劳性能,因此,三种焊接接头的 S-N 曲线无显著差异。结合前文分析,三种焊接接头的焊缝均含有大量针状铁素体,这种细小的晶粒与相邻晶粒构成大角度晶界,显著提高位错和裂纹扩展阻力,疲劳性能优异。而热影响区由含量不一的粒状贝氏

体、先共析铁素体和珠光体构成,粒状贝氏体中的富碳奥氏体同样可以阻碍位错滑移,增加热影响区的强度和韧性。相比之下,母材中少量珠光体+铁素体组织是整个焊接接头中硬度最低的部位,较软的铁素体在循环载荷下容易发生位错增殖并积累,导致局部应力集中,成为疲劳裂纹的优先萌生区域。

图 8 所示为气保焊焊接接头在 380~420 MPa 应力水平下的宏观断口形貌,可以发现,随着应力水

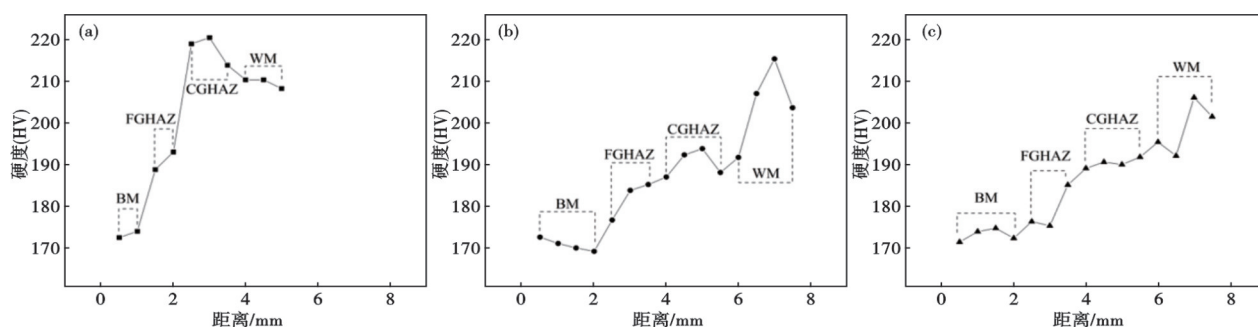


图6 FH420钢三种焊接接头的硬度分布:(a)二氧化碳气体保护焊,(b)单丝埋弧焊,(c)双丝埋弧焊

Fig. 6 The hardness distribution of the three welded joints of FH420 steel : (a) carbon dioxide gas shielded welding, (b) single wire submerged arc welding, (c) twin-wire submerged arc welding

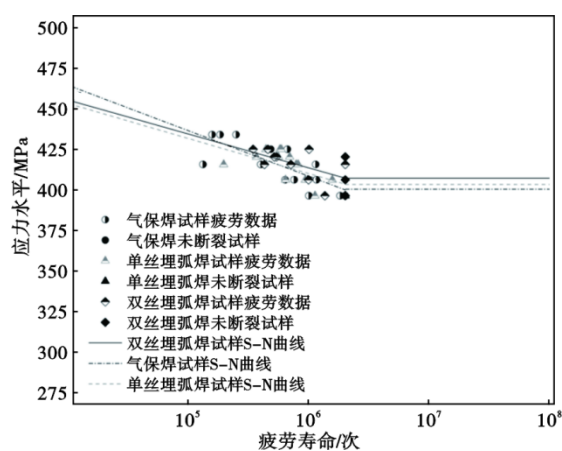


图7 FH420钢三种焊接接头的疲劳S-N曲线

Fig. 7 Fatigue S-N curves of three kinds of welded joints of FH420 steel

疲劳寿命也逐渐升高,在390~420 MPa应力水平下裂纹始终从表面发生,随着应力水平降低到380 MPa时,裂纹源由表面转化到试样内部,结合表3可知,失效位置由母材转移到焊缝,相较于相同应力水平下的母材处失效,焊缝处疲劳失效寿命下降约55%,图9为焊缝处失效的裂纹源和断裂区形貌,由图8(a)可以发现疲劳源为气保焊焊接接头多层多道间的未熔合缺陷,相较于单丝和双丝埋弧焊,气保焊热输入较低,由于气保焊本身热输入较小,热输入不足,熔池流动性可能变差,导致母材或层间金属未被充分熔化,形成未熔合缺陷,此外,由于热输入较低,为保证焊缝成形,需采用更多道次的焊接,焊道之间搭接区域增多,增加了产生未熔合缺陷的风险。图9(b)所示的断裂区有明显的等轴韧窝形貌,表明试样的断裂模式为韧性断裂。韧窝

表3 FH420钢三种焊接接头的疲劳试验结果

Table 3 Fatigue test results of three kinds of welded joints of FH420 steel

气保焊焊接接头			单丝埋弧焊焊接接头			双丝埋弧焊焊接接头		
应力水平/MPa	疲劳寿命/次	断裂位置	应力水平/MPa	疲劳寿命/次	断裂位置	应力水平/MPa	疲劳寿命/次	断裂位置
420	0.182×10^6	BM	410	0.437×10^6	BM	410	0.999×10^6	BM
420	0.156×10^6	BM	410	0.572×10^6	BM	410	0.342×10^6	BM
420	0.247×10^6	BM	410	0.588×10^6	BM	410	0.454×10^6	BM
410	0.480×10^6	BM	405	0.365×10^6	BM	405	0.535×10^6	BM
410	0.453×10^6	BM	405	0.555×10^6	BM	405	0.513×10^6	BM
410	0.660×10^6	BM	405	0.689×10^6	BM	405	Run out	-
400	1.135×10^6	BM	400	0.195×10^6	BM	400	0.426×10^6	BM
400	0.396×10^6	BM	400	0.781×10^6	BM	400	0.704×10^6	BM
400	0.131×10^6	BM	400	0.811×10^6	BM	400	1.997×10^6	BM
390	0.633×10^6	BM	390	0.931×10^6	BM	390	0.990×10^6	BM
390	1.153×10^6	BM	390	1.561×10^6	BM	390	1.352×10^6	BM
390	0.751×10^6	BM	390	0.637×10^6	BM	390	Run out	-
380	1.811×10^6	BM	380	1.120×10^6	BM	380	1.352×10^6	BM
380	0.996×10^6	WM	380	Run out	-	380	Run out	-
380	Run out	-	380	Run out	-	380	Run out	-

中含有大量球形夹杂物,这是典型的焊缝处断裂特征。

图 10 为三种焊接接头在 400 MPa 应力水平下的疲劳微观断口形貌,从图 8(a)-(c)中可以发现位于母材处断裂的裂纹源头均为表面。结合表 3 可知,三种接头的抗疲劳性能良好,位于母材处断裂的试样即使在较高的应力水平下仍能展现较高的疲劳寿命。研究表明^[13],在循环应力的作用下,较软的晶粒内部发生反复的挤压和滑移,导致晶粒内部出现位错的反复塞积和增殖,使表面产生局部应力集中,当应力超过母材强度时,微裂纹开始萌生,此外,在气保焊焊接接头中出现高应力条件下失效发生母材,而低应力下有可能在焊缝处

发生疲劳失效的现象,这是由于高应力下母材位错和滑移增殖速度较快,而焊缝中的针状铁素体抗裂纹扩展能力优异,即便是存在初始缺陷,裂纹扩展的速度小于母材裂纹扩展速度,最终仍会体现为母材处发生失效。随着循环应力逐步扩展,形成图 10(a₂)-(c₂)所示的疲劳辉纹,疲劳辉纹代表每一次循环裂纹扩展的距离,与裂纹扩展方向垂直,最终当裂纹扩展一定程度剩余材料的强度不足以支撑循环载荷时,材料发生断裂失效,图 10(a₃)-(c₃)所示试样的断裂区为明显的撕裂韧窝形貌,表明材料在断裂时发生了明显的塑性变形,可见 FH420 钢的韧性良好。

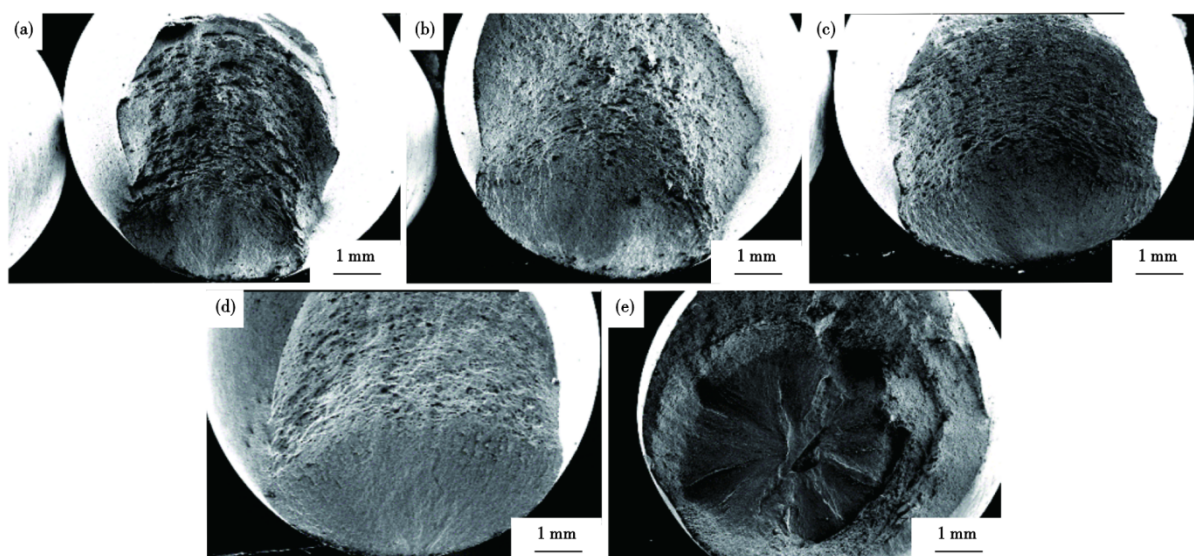


图 8 不同应力水平下 FH420 钢气保焊焊接接头宏观断口形貌: (a) 420 MPa, (b) 410 MPa, (c) 400 MPa, (d) 390 MPa, (e) 380 MPa
Fig. 8 Macroscopic fracture morphology of FH420 steel gas shielded welding joint under different stress levels : (a) 420 MPa, (b) 410 MPa, (c) 400 MPa, (d) 390 MPa, (e) 380 MPa

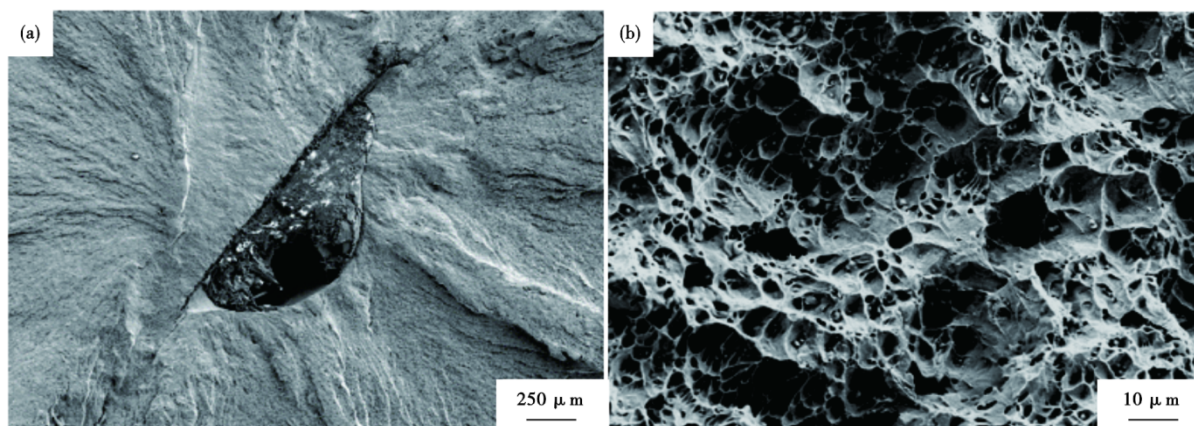


图 9 应力水平为 380 MPa 时 FH420 钢气保焊焊接接头断口形貌: (a) 裂纹源区, (b) 断裂区
Fig. 9 When the stress level is 380 MPa, the fracture morphology of FH420 steel gas shielded welding joint : (a) crack source area, (b) fracture zone

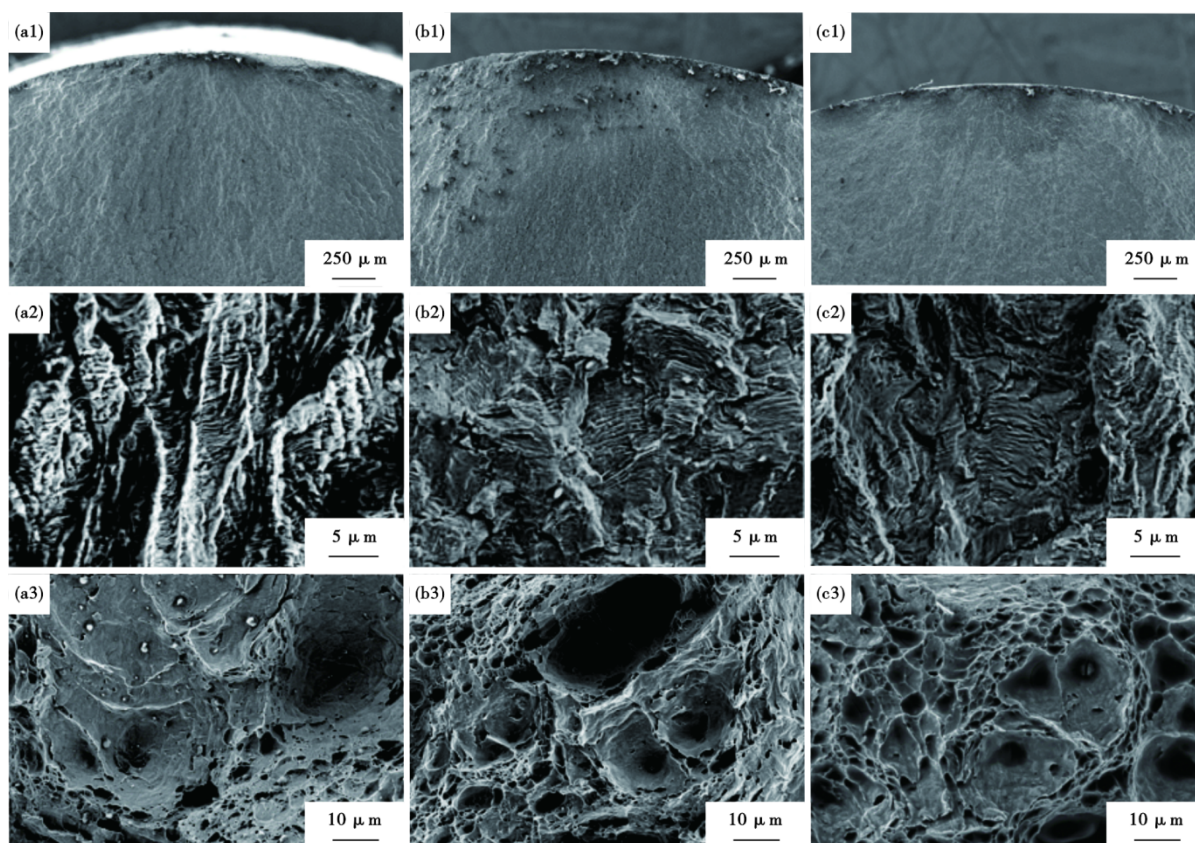


图10 应力水平为400 MPa时FH420钢三种焊接接头的断口形貌(a₁~a₃)二氧化碳气体保护焊焊接接头的疲劳源区、裂纹扩展区和断裂区;(b₁~b₃)单丝埋弧焊焊接接头的疲劳源区、裂纹扩展区和断裂区;(c₁~c₃)双丝埋弧焊焊接接头的疲劳源区、裂纹扩展区和断裂区

Fig. 10 Fracture surface morphology of three types of FH420 steel welded joints at a stress level of 400 MPa (a₁~a₃). fatigue source area, crack propagation zone, and fracture zone in CO₂ gas shielded arc welded joint; (b₁~b₃) fatigue source area, crack propagation zone, and fracture zone in single-wire submerged arc welded joint; (c₁~c₃) fatigue source area, crack propagation zone, and fracture zone in dual-wire submerged arc welded joint.

3 结论

1)80 mm厚FH420钢1/4处母材的组织为铁素体和少量珠光体,随着热输入的增加,细晶区铁素体和珠光体体积逐渐增大,粗晶区粒状贝氏体含量减少,先共析铁素体含量增加,焊缝的针状铁素体含量减少,网络状的先共析铁素体尺寸增大,含量增加。

2)采用了三种焊接工艺,包括气保焊、单丝埋弧焊和双丝埋弧焊,分别对FH420钢进行焊接接头制备。通过对各焊接接头S-N曲线的拟合分析可知,在200万次循环寿命下,其疲劳极限分别为:气保焊384 MPa,单丝埋弧焊387 MPa,双丝埋弧焊391 MPa。尽管三种焊接接头的热输入不同,但其疲劳S-N曲线差异不显著,接头的微观组织变化对疲劳性能影响有限。造成这一结果的主要原因是,疲劳试样的失效部位大部分位于组织一致的母材

区域。即便是在高应力水平下,三种焊接接头的疲劳寿命仍然较高,说明三种焊接接头的疲劳性能优异。

3)单丝埋弧焊和双丝埋弧焊焊接接头的疲劳失效位置均位于硬度较低的母材,二氧化碳气体保护焊焊接接头低应力水平下出现了焊缝处失效现象,失效原因为未熔合焊接缺陷,焊缝处失效的疲劳寿命明显低于相同应力水平下母材处疲劳寿命。

4)气保焊相较于单丝和双丝埋弧焊热输入更低,其较低的热输入易导致熔池流动性变差,使母材或层间金属未能充分熔合而形成未熔合缺陷;同时,为保证焊缝成形需增加焊接道次,导致焊道间搭接区域增多,进一步增大了未熔合缺陷产生的风险,进而影响疲劳性能。由于热输入在7~38 kJ/cm范围内时热影响区组织对疲劳性能无显著影响,因此,在焊接FH420钢板时,可优先采用热输入较大

的埋弧焊工艺,或选用较大热输入的气体保护焊工艺,以兼顾疲劳性能优化与焊接效率提升。

参考文献

- [1] Yuan Y C, Zheng M T, Xue H X, et al. Nonlinear riser-seabed interaction response among touchdown zone of a steel catenary riser in consideration of vortex-induced vibration[J]. Ocean Engineering, 2021, 227: 108891.
- [2] 朴俊凯. 海洋工程用 4140 钢的腐蚀与疲劳行为研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2024.
- [3] 沈楠楠, 王松涛, 王振华, 等. 不同类型 S420 超高强钢焊接接头的疲劳性能对比研究[J]. 焊接技术, 2021, 50(9): 66-68.
- [4] 李家安, 赵 坦, 李文斌, 等. 开冷温度对 420 MPa 级海洋工程用钢延伸性能的影响[J]. 轧钢, 2024, 41(3): 21-28.
- [5] 刘德祥, 赵晋斌, 李恒坤, 等. 420 MPa 级海洋工程用钢大线能量焊接接头显微组织及力学性能研究[J]. 现代交通与冶金材料, 2022, 2(1): 33-39.
- [6] Ray T, Kundu J, Kundu A, et al. Fatigue behaviour of laser spot welds in dual phase 780 steel[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 132: 105374.
- [7] 王祖华, 李 冲, 薛 钢, 等. 焊接方法对 10Ni5CrMoV 钢接头疲劳性能的影响[J]. 材料开发与应用, 2017, 32(3): 1-4.
- [8] 王池权, 石 亮, 张祥春, 等. 焊接缺陷对异种铝合金 TIG 对接接头疲劳行为的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(7): 1505-1514.
- [9] 李 东, 陈怀宁, 刘 刚, 等. SS400 钢对接接头表面纳米化及其对疲劳强度的影响[J]. 焊接学报, 2002, 23(2): 18-21+3.
- [10] Nishikawa H A, Furuya Y, Igi S, et al. Effect of microstructure of simulated heat-affected zone on low- to high-cycle fatigue properties of low-carbon steels[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2020, 43(6): 1239-1249.
- [11] 白 云, 孙宪进, 刘观猷, 等. EH36 钢焊接接头疲劳性能研究[J]. 精密成形工程, 2025, 17(5): 143-151.
- [12] 吕光宙, 马泽铭, 许爱军, 等. 304 不锈钢激光焊接接头组织性能及断裂机理研究[J]. 精密成形工程, 2023, 15(9): 74-82.
- [13] 杨思恩. EH36 钢焊接接头腐蚀疲劳性能和断裂机制研究[D]. 天津: 天津大学, 2023.